



# Caractérisation de la qualité des éclairages artificiels (rendu des couleurs et confort visuel) en particulier pour les sources à lumières à diodes électro-luminescentes (DEL)

Jordi Nonne

## ► To cite this version:

Jordi Nonne. Caractérisation de la qualité des éclairages artificiels (rendu des couleurs et confort visuel) en particulier pour les sources à lumières à diodes électro-luminescentes (DEL). Instrumentations et Détecteurs [physics.ins-det]. Conservatoire national des arts et métiers - CNAM, 2015. Français. NNT : 2015CNAM1024 . tel-01344416

**HAL Id: tel-01344416**

**<https://theses.hal.science/tel-01344416>**

Submitted on 11 Jul 2016

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**ÉCOLE DOCTORALE**

**SMI - Sciences des Métiers de l'Ingénieur**

**THÈSE** présentée par :

**Jordi NONNE**

Réalisé au sein du Laboratoire commun de métrologie LNE-CNAM

Soutenue le : **15 Décembre 2015**

Pour obtenir le grade de : **Docteur du Conservatoire National des Arts et Métiers**

Discipline/ Spécialité : Lasers, Nanosciences et Métrologie

**Caractérisation de la qualité des éclairages  
artificiels (Rendu des couleurs et confort visuel) en  
particulier pour les sources de lumière à diodes  
électroluminescentes (DEL)**

**THÈSE dirigée par :**

**Marc HIMBERT**

Professeur, CNAM

**RAPPORTEURS :**

**Raphaël LABAYRADE**

**Georges ZISSIS**

Enseignant-chercheur, ENTPE

Professeur, Université de Toulouse

**Président du Jury :**

**Frédéric DU BURCK**

Professeur, CNAM

**JURY :**

**Pierre FALZON**

**Marc HIMBERT**

**Raphael LABAYRADE**

**Dominique RENOUX**

**Georges ZISSIS**

Professeur, CNAM

Professeur, CNAM

Enseignant-chercheur, ENTPE

Ingénieur - Docteur, LNE

Professeur, Université de Toulouse

**Invités :**

**Gaël OBEIN**

**Jean-Louis MEYZONNETTE**

Maitre de conférences, CNAM

Professeur, Institut d'Optique



# Remerciements

Les travaux présentés dans ce manuscrit de thèse ont été réalisés au Laboratoire National de métrologie et d'Essais (LNE) sur le site de Trappes. Je tiens à remercier le directeur, M. Jean Luc LAURENT pour m'avoir accueilli dans ces lieux.

Je souhaite remercier Olivier FARON, directeur du Conservatoire National des Arts et Métiers(CNAM), mon université, et également Antoine BEVORT, directeur de l'Ecole Doctorale "Bernard Gregory".

Je tiens à remercier les institutions et les acteurs à l'origine du projet dans lequel s'inscrivent mes travaux de recherche notamment l'European Research Metrology Programme (EMRP), et la contribution de l'Association Nationale de la Recherche et de la Technologie (ANRT).

Je souhaite également porter une attention à tous mes supérieurs hiérarchiques, avec qui j'ai eu des échanges très enrichissants tout au long de ma thèse, à savoir Lionel DREUX, directeur de la Direction Métrologie Scientifique et Industrielle (DMSI) du LNE, Jean Rémy FILTZ, responsable du pôle photonique énergétique et enfin Jimmy DUBARD, responsable du département photonique.

Mes remerciements vont également à Marc HIMBERT, mon directeur de thèse, pour avoir encadré mes travaux et pour les relations de confiance que nous avons pu entretenir.

Je tiens à remercier mes rapporteurs Raphaël LABAYRADE et Georges ZISSIS qui ont accepté de relire et corriger ce manuscrit ainsi que Frédéric DU BURCK, président du jury et les membres du jury Pierre FALZON, Jean-Louis MEYZONNETTE et Gaël OBEIN pour avoir bien voulu assister à ma soutenance et évaluer mon travail.

J'adresse ma reconnaissance toute particulière à Dominique RENOUX, mon référent au sein du LNE. Il m'a beaucoup appris durant ces trois années. Son professionnalisme, sa gentillesse et sa disponibilité m'ont guidé dans une grande rigueur et le respect de la démarche scientifique. Je le remercie également pour ses remarques constructives et bienveillantes dans l'élaboration de ce manuscrit.

Je tenais à faire part de ma gratitude à l'ensemble de l'équipe photonique, Romain, les François, Bernard, Thierry, Isabelle, Caroline, Pierre, Jean, Marc, KhuongMinh, Mai-huong, Olivier, Philippe, Guillaume, Gaël et Martin pour leur disponibilité et pour toutes les



discussions informelles que nous avons pue avoir. J'associe également Philipe, Dominique, Jean-Noël, Max, Liliane à ce soutien.

Je remercie l'ensemble du personnel du LNE que j'ai côtoyé tout au long de la thèse, et particulièrement les personnes qui ont été volontaires pour effectuer les expériences subjectives.

Je remercie l'ensemble des contacts professionnels que j'ai pu tisser pour leurs conseils scientifiques et techniques, en particulier les échanges que j'ai eu avec Sophie JOST-BOISSARD, Frédérique LE LOUP ainsi que Kevin SMET.

Enfin ma reconnaissance va à ma fiancée, Julie AIRIAU, pour sa patience, son aide et sa présence au quotidien. Un grand merci à mes parents pour m'avoir soutenu et épaulé avant et pendant cette thèse. Merci également à mes deux sœurs pour leurs intérêts sur mes travaux, Nora pour avoir relu certains de mes articles en anglais et Ysé, pour ses faibles demandes de résolution de problèmes informatiques.

Je remercie l'ensemble de ma famille, de ma belle famille et tous mes amis pour avoir fait l'effort d'essayer de comprendre les spécificités de mon étude et pour m'avoir accompagné dans ma motivation.

Merci à tous de m'avoir suivi dans cette aventure.

## Résumés

Cette thèse a été réalisée en parallèle avec le projet de recherche « ENG05 lighting », un programme européen de recherche en métrologie réunissant une quinzaine d'instituts nationaux de métrologie en Europe. L'apparition de nouvelles solutions d'éclairage utilisant des diodes à électroluminescence (DEL) n'apporte pas seulement une efficacité en termes de diminution de puissance consommée mais elles doivent également répondre à des critères de qualité de lumière pour l'utilisateur selon l'environnement.

L'étude se concentre sur les problématiques du confort visuel ainsi que sur les indices du rendu des couleurs conformes à ceux de la Commission International de l'Eclairage (CIE) qui ne permettent pas de prédire une évaluation fiable en ce qui concerne ces nouveaux éclairages à l'état solide.

Cette recherche s'appuie sur les calculs informatisés des métriques existantes, les résultats de plusieurs expériences subjectives réalisées dans un environnement contrôlé et reproductible et leurs caractérisations. Un premier modèle capable de prédire le confort visuel d'un scénario d'éclairage est réalisé et décrit. Plusieurs axes d'amélioration des métriques du rendu des couleurs sont étudiés.

L'ensemble des expériences intègre des solutions d'éclairages traditionnels. A l'aide de carte de luminance, les résultats obtenus sont comparés aux performances des sources respectives.

Mots-clefs : Rendu des couleurs, confort visuel, qualité des éclairages, expérience subjective, DEL, UGR, IRC, CRI, éblouissement, carte de luminance.

## Abstract

The ENG05 project funded by the European Research Metrology Programme (EMRP) addresses measurement aspects of both quantity and quality of new lighting such as solid-state lighting (SSL).

The current Colour Rendering Index (CRI) of the CIE (International Commission on Illumination) fails to predict the subjective ranking of the lighting sources based on DEL (light emitting diode). Along with a study of colour rendering metrics based on an extensive computation of relevant metrics and colorimetric calculations, a study on visual comfort is performed and both are presented in this thesis.

For interior lighting standards it doesn't exist a metric able to predict the visual comfort of an environment. Therefore, the aim of this study consists in a contribution to the human visual comfort characterization according to various realistic configurations considering the comparison between DEL luminaires and traditional lighting technologies (fluorescent, halogen).

The analysis of the results DEL to develop a model which could be deemed worthy of consideration by CIE.

Keywords: color rendering, visual comfort, lighting quality, subjective experiment, DEL, UGR, CRI, glare, luminance maps.

# Table des matières

<b>INTRODUCTION AUX TRAVAUX DE LA THESE .....</b>	<b>1</b>
---	----------

<b>PREMIERE PARTIE : LA VISION ET LES SOURCES LUMINEUSES .....</b>	<b>5</b>
--	----------

<b>PHYSIQUE DE L'INFORMATION LUMINEUSE .....</b>	<b>7</b>
--	----------

CARACTERISTIQUES DES ONDES LUMINEUSES ET DES PHENOMENES OPTIQUES :.....	7
---	---

HISTORIQUE .....	7
------------------	---

LA REFRACTION.....	8
--------------------	---

POLARISATION .....	10
--------------------	----

DUALITE ONDE/CORPUSCULE .....	11
-------------------------------	----

LES GRANDEURS PHOTOMETRIQUES.....	12
-----------------------------------	----

NOTION DE TYPE DE SOURCES :.....	17
----------------------------------	----

SYNTHESE DES COULEURS .....	19
-----------------------------	----

TEMPERATURE DE COULEUR PROXIMALE (TCP).....	21
---	----

<b>VISION HUMAINE .....</b>	<b>25</b>
-----------------------------	-----------

PRINCIPE DE L'ŒIL .....	25
-------------------------	----

PHYSIOLOGIE DE L'ŒIL.....	27
---------------------------	----

PHOTORECEPTEURS .....	31
-----------------------	----

LES TYPES DE VISION .....	35
---------------------------	----

LA VISION DES COULEURS .....	36
------------------------------	----

LES ESPACES COLORIMETRIQUES DE LA CIE .....	39
---	----

ADAPTATION DE L'ŒIL. ....	41
---------------------------	----

<b>PROPRIETES PHYSIQUES ET CARACTERISTIQUES TECHNIQUES DES ECLAIRAGES .....</b>	<b>43</b>
---	-----------

LA LAMPE A FILAMENT : DU TUNGSTENE A L'HALOGENE .....	43
---	----

LES LAMPES A DECHARGE: LES FLUO ET LES LAMPES A HAUTE PRESSION.....	45
---	----

DIODES ELECTRO-LUMINESCENTES.....	47
-----------------------------------	----

<b>DEUXIEME PARTIE : CARACTERISATIONS PHYSIQUES ET QUALITE DES ECLAIRAGES .....</b>	<b>53</b>
---	-----------

<b>CARACTERISATIONS DES ECLAIRAGES.....</b>	<b>54</b>
---	-----------

LES MOYENS DE CARACTERISATIONS PHYSIQUES ET LEURS ETALONNAGES.....	54
--	----

<b>DEVELOPPEMENT DES OUTILS DE CARACTERISATION .....</b>	<b>62</b>
--	-----------

GONIOCAM.....	62
---------------	----

TETE OPTIQUE .....	70
<b>ETAT DE L'ART DE LA MESURE DE LA QUALITE DES ECLAIRAGES .....</b>	<b>72</b>
LE RENDU DES COULEURS .....	72
LE CONFORT VISUEL.....	89
<b><u>TROISIEME PARTIE : PRESENTATION DES EXPERIENCES SUBJECTIVES .....</u></b>	<b><u>95</u></b>
<b>EXPERIENCE SUR LE RENDU DES COULEURS .....</b>	<b>96</b>
DESCRIPTION DU SALON .....	96
PRESENTATION DES MESURES PHYSIQUES.....	102
PRESENTATION DES RESULTATS .....	109
<b>EXPERIENCE SUBJECTIVE SUR LE CONFORT VISUEL : .....</b>	<b>117</b>
DESCRIPTION DES QUATRE CONFIGURATIONS.....	117
BUT DE L'EXPERIENCE.....	123
LES TECHNOLOGIES UTILISEES .....	125
DESCRIPTION DU PROTOCOLE D'EXPERIMENTATION .....	127
PRESENTATION DES MESURES PHYSIQUES.....	129
PRESENTATION DES RESULTATS SUBJECTIFS .....	146
<b><u>QUATRIEME PARTIE : EXPLOITATION DES RESULTATS ET DEVELOPPEMENT.....</u></b>	<b><u>153</u></b>
<b>RENDU DES COULEURS.....</b>	<b>154</b>
COMPARAISON DES METRIQUES EXISTANTES .....	155
CORRELATION DES METRIQUES AVEC L'EXPERIENCE SUBJECTIVE .....	156
IMPACT DE CERTAINS PARAMETRES .....	159
DEVELOPPEMENT D'UN INDICE: .....	179
CONCLUSION SUR LE RENDU DES COULEURS .....	186
<b>CONFORT .....</b>	<b>188</b>
REALISATION DU MODELE DE CONFORT VISUEL .....	189
PARAMETRE D'INCONFORT: L'EBLOUISSEMENT .....	190
PARAMETRE DE CONFORT .....	192
PRESENTATION DES PARAMETRES VISUELS.....	194
PREMIERE APPROCHE D'UN MODELE DE CONFORT VISUEL.....	200
CORRELATION DU MODELE AVEC L'EXPERIENCE SUBJECTIVE.....	202
APPROCHE MATHEMATIQUE .....	204

CORRELATION DU MODELE MATHEMATIQUE AVEC L'EXPERIENCE SUBJECTIVE.....	206
<b><u>CONCLUSION.....</u></b>	<b><u>211</u></b>
<b><u>BIBLIOGRAPHIE .....</u></b>	<b><u>215</u></b>
<b><u>SOURCES DES FIGURES .....</u></b>	<b><u>A</u></b>
<b>ANNEXE 1 : INTERFACE DU PROGRAMME .....</b>	<b>I</b>
<b>ANNEXE 2 : METROLOGIE DES RAYONNEMENTS OPTIQUES EN FRANCE .....</b>	<b>III</b>
<b>ANNEXE 3: RESULTATS DE L'EXPERIENCE SUBJECTIVE SUR LA COULEUR .....</b>	<b>IV</b>
<b>ANNEXE 4 : RESULTATS DE L'EXPERIENCE SUBJECTIVE SUR LE CONFORT VISUEL .....</b>	<b>XIV</b>
<b>ANNEXE 5 : VALEURS DES PARAMETRES PHYSIQUES ISSUES DES MESURES ET UTILISEES DANS LES CALCULS DES MODELES SUR LE CONFORT VISUEL .....</b>	<b>XX</b>
<b>ANNEXE 6 : NOTION D'UNE SOURCE LAMBERTIENNE .....</b>	<b>XXI</b>
<b>ANNEXE 7 : STATISTIQUES POUR LES EXPERIENCES SUR LE CONFORT VISUEL.....</b>	<b>XXII</b>

## Liste des tableaux

Table 1	Grandeurs photométriques .....	13
Table 2	Propriétés des cônes et bâtonnets .....	33
Table 3	Coordonnées de Munsell .....	75
Table 4	TCS utilisés pour le calcul du CRIRa96 .....	77
Table 5	Les TCS utilisés par le CQS .....	79
Table 6	Échantillons de couleurs du FCI .....	83
Table 7	Les six ordres utilisés .....	102
Table 8	Résultats des métriques de toutes les sources utilisées dans le temps ainsi que la température de couleur. <i>Note: la moyenne prend en compte d'autres mesures</i> .....	108
Table 9	Variation des niveaux lumineux dans le temps .....	109
Table 10	Opposition des paramètres à évaluer .....	110
Table 11	Corrélation des attributs subjectifs .....	116
Table 12	Ordre de passage dans l'expérience évaluant l'éblouissement .....	128
Table 13	Niveaux lumineux et température de couleurs mesurés au niveau de l'œil .....	133
Table 14	Luminance de fond et calcul de l'UGR .....	136
Table 15	Luminance et écart type pour les différentes zones du test en salon .....	139
Table 16	Résultats de l'UGR pour le test en salon .....	140
Table 17	Luminance de fond calculée pour le test en compartiments .....	142
Table 18	Résultats CIE UGR du test en compartiments .....	142
Table 19	Luminance de fond calculée pour le test en bureau .....	144
Table 20	Résultats CIE UGR du test en bureau .....	145
Table 21	Notes des critères à évaluer lors de l'expérience sur l'éblouissement .....	149
Table 22	Notes des critères à évaluer lors de l'expérience en salon .....	149
Table 23	Note des critères à évaluer lors de l'expérience en compartiments .....	151
Table 24	Notes des critères à évaluer lors de l'expérience en bureau .....	152
Table 25	Corrélations des métriques avec la base de 122 spectres. ....	155
Table 26	corrélations métriques-préférence subjective .....	157
Table 27	résultats du CRI 2012 avec les facteurs K d'origine .....	160
Table 28	Différences maximales observées sur les métriques par rapport aux technologies présentes dans l'expérience des couleurs .....	173
Table 29	Coefficients de corrélation de Pearson entre les métriques et les données subjectives .....	186
Table 30	Poids (en %) de chaque paramètre en fonction de la situation .....	201
Table 31	exemple des facteurs trouvés par le système d'équations .....	205
Table 32	facteurs mathématiques choisis. ....	206

# Liste des figures

Figure 1	Domaine des fréquences .....	8
Figure 2	Propagation d'une onde lumineuse .....	8
Figure 3	Loi de Snell.....	9
Figure 4	Réfraction d'ondes à travers un prisme .....	10
Figure 5	Phénomène de polarisation .....	11
Figure 6	Illustration de la grandeur relative à l'éclairement .....	13
Figure 7	Illustration de la grandeur relative à l'intensité lumineuse .....	15
Figure 8	Illustration de la grandeur relative à la notion de luminance .....	17
Figure 9	Synthèse additive des couleurs .....	19
Figure 10	Synthèse soustractive des couleurs .....	20
Figure 11	Variation de la température de couleur .....	21
Figure 12	Gamme des températures de couleur .....	22
Figure 13	Composition schématique d'un œil .....	26
Figure 14	Mécanisme d'accommodation de l'œil .....	29
Figure 15	Composition des photorécepteurs de la rétine .....	31
Figure 16	Sensibilité spectrale des photorécepteurs .....	32
Figure 17	Répartition des photorécepteurs sur la rétine .....	33
Figure 18	De la vision scotopique à la vision photopique .....	35
Figure 19	Réponse XYZ .....	39
Figure 20	Espace xyz en 3D et en version 2D (xy) .....	39
Figure 21	Espace des couleurs Lab.....	41
Figure 22	Lampes à filament .....	44
Figure 23	Exemple de la répartition spectrale d'une source Halogène .....	45
Figure 24	Exemple de sources fluorescentes (FL et CFL) .....	46
Figure 25	Exemple de spectres de sources fluorescentes .....	47
Figure 26	Lampes à décharge (gauche) source HMI (droite) .....	47
Figure 27	Exemples de sources à DEL .....	48
Figure 28	Principe de fonctionnement des couches de jonction d'une DEL .....	49
Figure 29	Evolution des efficacités lumineuses des technologies traditionnelles et DEL .....	50
Figure 30	Répartition spectrale d'un Cluster associant 3 DEL (bleu - vert - rouge) .....	51
Figure 31	Répartition spectrale d'une DEL avec excitation dans le bleu + phosphore .....	51
Figure 32	Répartition spectrale d'une DEL NUV .....	52
Figure 33	Goniomètre à miroir tournant du LNE .....	54
Figure 34	Exemple des principes d'utilisation d'une sphère d'intégration .....	56
Figure 35	Schéma montrant une mesure au luminancemètre .....	58
Figure 36	Le CDS2100 et une tête optique.....	59
Figure 37	Le CS1000.....	59
Figure 38	Les lunettes : eye-traker .....	61
Figure 39	Gauche : rotation autour du point nodal ; droite : rotation derrière le point nodal .....	62
Figure 40	Le Goniocam .....	63
Figure 41	Gauche: une image recombinaison avec les coefficients correcteurs; droite : sans ces coefficients ..	65
Figure 42	La transmission relative de chacune des densités optiques .....	66
Figure 43	Réponse spectrale de la caméra (capteur + filtre $V(\lambda)$ ) - données constructeur .....	66
Figure 44	Sensibilité du capteur CCD .....	67
Figure 45	Angles de champs en fonction de la mise au point pour les deux méthodes .....	68
Figure 46	Une des images de la sphère d'intégration permettant de déterminer une des valeurs de la matrice de correction .....	69
Figure 47	Gauche : Réponse optique causée sur le capteur à cause de l'objectif. Droite : Réponse du capteur sans objectif .....	69
Figure 48	Scène sans correction (gauche) et scène corrigée (droite).....	70
Figure 49	Réponse en coordonnées polaires de la tête optique .....	71
Figure 50	Diagramme de fonctionnement de l'indice de rendu des couleurs .....	76
Figure 51	L'angle solide $W_n$ .....	92
Figure 52	Représentation des angles $\alpha$ et $\beta$ utilisés pour le calcul de l'UGR.....	93
Figure 53	Les 15 échantillons du "Desaturated Munsell" à classer dans l'ordre avec l'échantillon d'origine .....	99
Figure 54	Panélisme effectuant le test .....	100
Figure 55	Répartition spectrale du RGB.....	103

Figure 56	Répartition spectrale du RGBY .....	103
Figure 57	Répartition spectrale du NUV .....	104
Figure 58	Répartition spectrale de la solution à DEL WW (warm white) utilisant les sources de manufacture Toshiba .....	104
Figure 59	Répartition spectrale de la solution à DEL CW (cold white) utilisant les sources de manufacture Kryona .....	104
Figure 60	Répartition spectrale de la solution à DEL WR (warm red) utilisant les sources de manufacture Osram .....	105
Figure 61	Répartition spectrale de la solution à tubes fluorescents froids .....	105
Figure 62	Répartition spectrale de la solution fluorescente chaude .....	106
Figure 63	Répartition spectrale de la solution halogène .....	106
Figure 64	Photos de la corbeille des fruits et légumes sous les différents éclairages .....	111
Figure 65	Moyenne des notes subjectives .....	112
Figure 66	Différence pour le paramètre "préférence" pour le premier groupe et le deuxième groupe .....	113
Figure 67	Différence du paramètre "préférence" entre le premier passage et le deuxième .....	113
Figure 68	Densité pour le paramètre de la fidélité des couleurs .....	114
Figure 69	Variabilité donnée par le test PCA de toutes les sources .....	115
Figure 70	Vue schématique de coté du dispositif permettant d'évaluer l'éblouissement .....	118
Figure 71	Vue schématique de dessus du dispositif permettant d'évaluer l'éblouissement .....	118
Figure 72	Photos de l'installation permettant d'évaluer l'éblouissement (gauche : prise derrière la position de l'observateur, droite: prise du coin gauche du panneau diffusant vers l'observateur) .....	119
Figure 73	Configuration halogène (gauche: position 1; droite : position 2) .....	120
Figure 74	Configuration de spots à DEL (gauche: position 1; droite : position 2) .....	120
Figure 75	Configuration à DEL diffuse n°1 (gauche: position 1; droite : position 2) .....	121
Figure 76	Configuration à DEL diffuse n°2 (gauche: position 1; droite : position 2) .....	121
Figure 77	Les quatre configurations des compartiments .....	122
Figure 78	Les quatre configurations du bureau .....	123
Figure 79	Solutions utilisées dans l'expérience permettant d'évaluer l'éblouissement .....	125
Figure 80	Distributions spectrales relatives des sources utilisées dans l'expérience sur l'éblouissement ...	129
Figure 81	Distributions spectrales relatives des sources utilisées dans le test en salon .....	130
Figure 82	Distributions spectrales relatives des sources utilisées dans l'expérience en compartiments ....	131
Figure 83	Distributions spectrales relatives des sources utilisées dans l'expérience en bureau .....	132
Figure 84	Numérisation des niveaux lumineux par le Goniocam pour l'expérience sur l'éblouissement ...	135
Figure 85	Carte de luminance de l'expérience en salon .....	138
Figure 86	Zones de luminance utilisées dans l'expérience en salon .....	138
Figure 87	Carte de luminance de l'expérience en compartiments .....	141
Figure 88	Zones de luminance utilisées dans l'expérience en compartiments .....	141
Figure 89	Carte de luminance de l'expérience en bureau .....	143
Figure 90	Zones de luminance utilisées dans l'expérience en bureau .....	144
Figure 91	Taille relative de la pupille avec l'inverse des niveaux lumineux .....	145
Figure 92	Taille relative de la pupille avec l'inverse des niveaux lumineux et un facteur correctif lié à la quantité de bleu .....	146
Figure 93	Analyse LSD pour le paramètre du confort dans le bureau .....	147
Figure 94	Moyennes des notes dans les deux sens .....	148
Figure 95	Graphique des résultats de l'expérience en salon .....	150
Figure 96	Graphique des résultats de l'expérience en compartiments .....	151
Figure 97	Graphique des résultats de l'expérience en bureau .....	152
Figure 98	Catégorie et répartition des 122 spectres considérés .....	154
Figure 99	Résultats des métriques et score de la préférence subjective .....	156
Figure 100	Figures radars .....	159
Figure 101	Classements des résultats du CRI2012 avec les facteurs d'échelle K d'origine .....	160
Figure 102	Classements des résultats du CRI2012 avec les nouveaux facteurs d'échelle k .....	161
Figure 103	Classements des résultats du CRI2012 des jeux de 9, 17,20 et 40 TCS .....	162
Figure 104	Gaussienne utilisée pour faciliter nos modélisations et la forme théorique. ....	163
Figure 105	Comparaison entre le jeu de TCS théoriques et notre jeu de TCS utilisant la forme gaussienne .....	163
Figure 106	Impact des variations sur la largeur des gaussiennes .....	164
Figure 107	Impact du décalage des jeux de TCS .....	165
Figure 108	Comparaison du CRI2012 en fonction des jeux des TCS utilisés avec le facteur K d'origine ...	166
Figure 109	Comparaison du CRI2012 en fonction des jeux des TCS utilisés avec le facteur K recalculé ..	167
Figure 110	Comparaison du GAI, avec nos indicateurs de l'espace couleurs et de chroma .....	168



Figure 111	Comparaison du CRI2012, avec nos indicateurs de l'espace couleurs et de chroma.....	169
Figure 112	Comparaison du CRI2012, avec nos indicateurs de l'espace couleurs, de chroma et de contraste couleurs	170
Figure 113	Comparaison du GAI, du CRI2012 et de notre indicateur de l'espace couleurs.....	170
Figure 114	Comparaison du GAI, du CRI2012 et de notre indicateur de chroma.....	172
Figure 115	Moyenne des scores obtenus par type de solution et par méthode.....	172
Figure 116	Variation du facteur « D » pour le CRI2012 avec 17 TCS mathématiques.....	174
Figure 117	Variation du facteur « D » pour le CRI2012 avec 17 TCS réels.....	174
Figure 118	Variation du facteur « D » pour le CRI2012 avec 210 TCS réels.....	174
Figure 119	Variation du facteur « D » pour le CRI2012 avec 1000 TCS réels.....	174
Figure 120	Variation du facteur « D » pour le CRICAM 02 UCS.....	175
Figure 121	Variation du facteur « D » pour le CRI00.....	175
Figure 122	Variation du facteur « D » pour le MCRI.....	175
Figure 123	Variations des résultats du MCRI en fonction de la CCT d'un corps noir.....	176
Figure 124	Variations des résultats du CRI2012_17M en fonction de la CCT d'un corps noir.....	176
Figure 125	Variations des résultats du CRICAM en fonction de la CCT d'un corps noir.....	177
Figure 126	Variations des résultats du CRI00 en fonction de la CCT d'un corps noir.....	177
Figure 127	Répartition dans l'espace xy des 80 TCS mathématiques (rose) et des 1000 échantillons réels du CRI2012	179
Figure 128	Jeu développé de TCS mathématiques.....	180
Figure 129	Bleu saturé.....	181
Figure 130	Bleu peu saturé.....	181
Figure 131	Pourpre saturé.....	182
Figure 132	Pourpre non saturé.....	182
Figure 133	Rouge saturé.....	182
Figure 134	Rouge peu saturé.....	183
Figure 135	Vert saturé.....	183
Figure 136	Vert peu saturé.....	183
Figure 137	Distribution de l'ensemble des TCS en fonction des longueurs d'onde.....	184
Figure 138	Comparaison du CRI2012 en fonction des jeux de TCS.....	185
Figure 139	Ecart colorimétriques observés des 80 TCS mathématiques.....	185
Figure 140	Fonction de pondération entre les paramètres de confort et d'inconfort.....	190
Figure 141	Comparaison entre la formule classique de la CIE UGR et des notes subjectives.....	191
Figure 142	CIE UGR et la notation du confort.....	192
Figure 143	rosasse illustrant les paramètres influençant le confort visuel.....	193
Figure 144	Courbe du niveau de confort en fonction du niveau relatif de luminance.....	194
Figure 145	Distribution des luminances sur le plan de travail: à gauche une source diffuse, à droite des non-uniformités dues au réflecteur.....	195
Figure 146	Différence entre les transitions.....	197
Figure 147	Variation de la TCP spatialement.....	199
Figure 148	Organigramme de fonctionnement de notre modèle.....	200
Figure 149	Comparaison entre le modèle et les notes subjectives dans le test en salon.....	202
Figure 150	Comparaison entre le modèle et les notes subjectives dans le test en compartiments.....	203
Figure 151	Comparaison entre le modèle et les notes subjectives dans le test en bureau.....	203
Figure 152	Comparaison entre le modèle et les notes subjectives pour l'ensemble des expériences.....	204
Figure 153	Comparaison entre le modèle mathématique et les notes subjectives dans le test en salon.....	207
Figure 154	Comparaison entre le modèle mathématique et les notes subjectives dans le test en compartiments	207
Figure 155	Comparaison entre le modèle mathématique et les notes subjectives dans le test en bureau.....	208
Figure 156	Comparaison entre le modèle mathématique et les notes subjectives pour l'ensemble des expériences	209

## Liste des abréviations

ANRT :	Association Nationale de la Recherche et de la Technologie
BGI :	British Glare index
CCRI :	Categorical Colour Rendering Index
CCT:	Correlated Color Temperature (ou TCP)
CDI :	Color Discrimination Index
CPI :	Color Preference Index
CRC :	Colour Rendering Capacity
CRI :	Color Rendering Index (ou IRC en français)
CSA :	Cone Surface Area
CW :	Cold White (source de type blanc froid)
CFL :	Compact Fluorescent Lamp
CIE:	Commission International de l'Eclairage
CQS :	Color Quality Scale
DEL :	Diode Electro-Luminescente (ou LED en anglais)
DGI :	Daylight Glare Index
DGI :	Discomfort Glare Index
EMRP :	European Metrology Research Programme
FCI :	Feeling of Contrast Index
FL :	Fluorescent Lamp
GAI:	Gamut Area Index
HAL:	Halogène
INRIM:	Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica
IRC :	Indice de Rendu des Couleurs (ou CRI en anglais)
JRP :	Joint Research Programme
LNE:	Laboratoire National de métrologie et d'Essais
LED :	Light Emitting Diode (ou DEL en français)
MCRI:	Memory Color Rendering Index
NCRI / CRI2012 :	New Color Rendering Index
NUV :	Near - UV
RCRI :	Rank order Colour Rendering Index
RGB :	Red Green Blue (rouge vert bleu)
RGBY :	Red Green Blue Yellow (rouge vert bleu jaune)
SSL :	Solid State Lighting (éclairage à état liquide)
TCS:	Test Color Sample
TCP :	Température de Couleur Proximale (ou CCP en anglais)
UGR :	Unified Glare Rating
UV:	Ultra-Violet
VCP :	Visual Comfort Probability
WR :	White Red (source de type blanc + DEL émettant dans le rouge)
WW :	Warm White (source de type blanc chaud)



# Introduction aux travaux de la thèse

Les travaux de recherche de cette thèse se sont déroulés au sein du département photonique du pôle photonique et énergétique de la direction métrologique scientifique et industrielle du LNE.

Le département photonique du LNE assure les essais et les étalonnages en photométrie et en radiométrie. Il effectue un certain nombre de travaux dans le cadre des programmes européens de recherche en association avec des instituts européens de métrologie (EURAMET).

Pour l'un des appels « Energie » du programme EMRP (2006-2013) un consortium d'instituts de métrologie nationaux et européens a proposé, en 2009, le projet ENG05 « Métrologie des éclairages à état solide ». Les éclairages à état solide représentent un potentiel d'économie d'énergie à cause de leurs bonnes efficacités lumineuses et de leurs flexibilités. Cependant une révision des méthodes de mesure des caractéristiques est nécessaire pour mieux informer l'utilisateur et ainsi accompagner le déploiement de ces nouvelles technologies.

Dans le cadre du projet ENG05, traitant des aspects de la mesure de quantité et de qualité de la lumière des nouveaux éclairages à base de Diodes Electro-Luminescentes (DEL), le LNE a reçu pour mission de conduire deux études respectivement sur le rendu des couleurs et le confort visuel. Ces deux études ont été les thèmes de recherche de ma thèse en liaison avec l'ENG05. Les indices de qualité de la Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) pour le rendu des couleurs (IRC) et l'éblouissement unifié (UGR) ont été développés pour les sources traditionnelles d'éclairage (halogène et fluorescent). Ils ne sont pas assez performants pour caractériser les nouvelles sources d'éclairage comme celles de l'éclairage à état solide dont les

DEL font partie. L'objet de cette étude consiste principalement à relier des caractéristiques optiques avec la perception visuelle humaine.

Comment établir des mesures sur le rendu des couleurs et le confort visuel d'une manière reproductible? L'évolution des technologies des sources lumineuses ouvre des perspectives intéressantes mais ne doit pas se faire au détriment de la qualité des éclairages. Il nous est apparu important d'étudier ce qui commande à la qualité du rendu des couleurs et au confort visuel tout en s'appuyant sur les connaissances dans ce domaine. De nombreux paramètres ne gagneraient-ils pas à être revisités en intégrant des éléments plus ciblés et mieux caractérisés pour les lieux de vie? Dans cette optique, nous proposons des pistes pour aider les diagnostics des impressions humaines traitant un grand nombre de situations lumineuses.

La difficulté de ce travail réside dans la conception d'espaces de tests intégrant à la fois des sources traditionnelles, des nouvelles technologies de type DEL et la possibilité d'y ajouter dans le futur d'autres sources lumineuses.

Notre exposé se déroule en plusieurs parties:

Le premier chapitre aborde les notions théoriques relatives au monde de l'optique. Après une introduction sur les grandeurs optiques relatives à la lumière, nous présentons le système visuel humain et pour finir les différentes technologies d'éclairage.

Le deuxième chapitre expose la préparation des travaux de thèse : le développement d'outils de caractérisation des sources d'éclairage et des ambiances lumineuses, la revue des métriques portant sur la qualité du rendu des couleurs et du confort visuel ainsi que l'état de l'art des pratiques relatives au confort visuel.

Le troisième chapitre présente les deux expériences subjectives qui ont été réalisées au LNE pour établir des métriques de qualité : la première expérimentation est consacrée au rendu des couleurs et la deuxième au confort visuel. Pour chacune de ces expériences nous décrivons les moyens mis en œuvre, le protocole de test, la caractérisation des ambiances lumineuses, et l'évaluation effectuée par les panelistes.

Le quatrième et dernier chapitre expose le travail effectué pour répondre aux différentes problématiques de notre étude. Il recense les différents axes de recherche réalisés afin d'établir d'une part une métrique de rendu des couleurs plus performante notamment pour les sources à DEL. D'autre part, cette étude nous a permis d'identifier différents principes utilisés dans

l'élaboration d'un modèle capable de prédire le confort visuel. L'analyse et la corrélation des résultats des expériences subjectives ouvrent une piste intéressante.

Nous concluons sur les perspectives et les améliorations possibles dans les innovations technologiques que représentent ces outils de caractérisation adaptés aux besoins humains.



# Première partie

## La vision et les sources lumineuses

Pour introduire cette recherche, les propriétés physiques de la lumière et les caractéristiques de la vision sont rappelées. L'œil, organe de la vision interprète les phénomènes de la lumière selon les ambiances lumineuses qui l'entourent. Celles-ci dépendent directement des sources lumineuses dont les technologies ont beaucoup changé au cours des siècles.

Les informations caractérisant les environnements lumineux sont, d'un point de vue physique, relatives au monde de l'optique et plus particulièrement à la photométrie qui étudie le rayonnement lumineux en rapport avec la perception visuelle humaine.

La vision est l'un des cinq sens les plus développés chez les êtres humains. Elle permet d'obtenir de nombreuses informations sur l'environnement : formes, mouvements et couleurs.

Nous commençons par rappeler quelques notions sur la physique optique et le principe de rayonnement lumineux avant de parler de l'organe humain réalisant la capacité d'utiliser ces fonctions : l'œil.

Nous aborderons la description de quelques espaces colorimétriques définis par l'homme.



Nous développerons enfin les technologies des sources lumineuses afin de mieux identifier leurs interactions avec le rendu des couleurs et le confort visuel des environnements lumineux.

# Physique de l'information lumineuse

## Caractéristiques des ondes lumineuses et des phénomènes optiques :

### Historique

Historiquement, l'optique, apparaît dès l'Antiquité. Euclide, disciple de Platon, écrit deux livres qui ont un succès considérable et durable : l'optique et la catoptrique. Dans l'Optique, il propose le concept du rayon comme direction de la propagation de la lumière et le concept de la propagation rectiligne. Il faut attendre le XVII<sup>ème</sup> siècle pour comprendre le mécanisme de la vision mais, à l'époque, il subsiste encore une grande confusion au sujet de la « couleur ».

Newton, Young, Helmholtz, Hering étudient les premiers la perception des couleurs. Maxwell apporte une contribution importante dans la théorie électromagnétique. Pour lui, la lumière est due à la propagation d'un champ magnétique et d'un champ électrique. Pour Fresnel, la lumière est formée par des vibrations transversales qui s'effectuent dans des directions perpendiculaires à celles de la propagation. Fresnel explique ainsi les interférences, la diffraction et la polarisation. Ces nouvelles explications paraissent inconciliables avec la théorie corpusculaire, comme par exemple l'effet photo-électrique. Einstein émet l'hypothèse des quanta de lumière en 1905 : la lumière serait formée de petits corpuscules appelés « photons ».

### Domaine de fréquence : Définition du spectre visible

Un rayonnement optique peut ainsi être caractérisé comme une onde électromagnétique [XXII]: fréquence, amplitude, polarisation. Le domaine qui nous intéresse est celui que l'œil est capable de capter : il s'agit du spectre visible se trouvant dans les longueurs d'onde comprise entre 380 et 780 nm ce qui correspond à l'observateur moyen tel que défini par la CIE. Les limites en longueur d'onde ne sont pas absolues car les rayonnements perceptibles dépendent de l'individu et des conditions de vision (Figure 1 ). Ce domaine du visible est encadré par les infrarouges aux fréquences inférieures, et les ultraviolets aux fréquences supérieures. Le graphique ci-dessous présente une partie du domaine de fréquence des ondes, avec leurs utilisations.

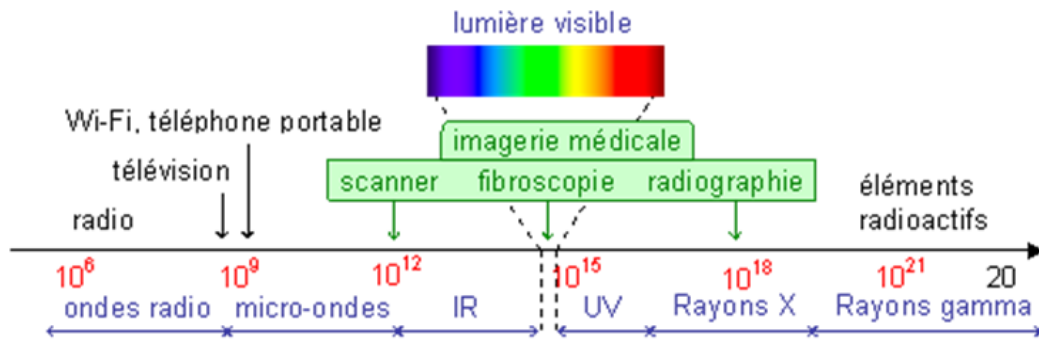


Figure 1 Domaine des fréquences

L'onde lumineuse est donc l'un des modèles utilisés pour représenter les rayonnements lumineux. Elle est définie par son sens de propagation  $\vec{V}$ , son champ électrique ou sa polarisation  $\vec{E}$  et son champ magnétique  $\vec{B}$  (Figure 2). Les variations des champs électriques et magnétiques sont liées par les équations de Maxwell.

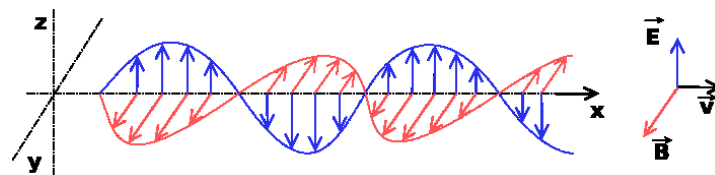


Figure 2 Propagation d'une onde lumineuse

Nous allons présenter dans les paragraphes suivants, quelques phénomènes comme la réfraction et la polarisation. Nous n'aborderons pas certains aspects comme la diffraction, qui ne nous semble pas nécessaire pour la compréhension de cette thèse.

## La réfraction

La lumière ne se réfléchit pas seulement sur les surfaces qu'elle frappe. Il lui arrive aussi de les traverser. Elle traverse certaines d'entre elles souvent en diminuant sa vitesse et en changeant de direction. Ce changement de direction ou déviation est connu sous le nom de réfraction. Il a lieu chaque fois que la lumière passe d'un milieu d'une certaine densité dans un autre d'une densité différente.

Dans le vide, la vitesse de la lumière est d'environ 300 000 kilomètres par seconde. Mais l'eau, qui est plus dense que le vide diminue cette vitesse d'environ 25%. Le verre qui est encore plus dense, la diminue d'environ 30% et le diamant encore davantage.

Cependant pour que la réfraction ait lieu, la lumière doit frapper le nouveau milieu selon un certain angle. La grandeur de cet angle détermine la grandeur de la déviation (Figure 3 ).

Snell essaye de mesurer cette déviation dans diverses substances transparentes (eau, verre, air). Plus tard, d'autres chercheurs sont capables de donner des valeurs numériques, appelées « indices de réfraction » aux différents pouvoirs de réfraction que montrent les diverses substances transparentes. Huygens découvre la formule mathématique qui résume les observations de Snell. Il montre que l'indice de réfraction, dans n'importe quelle substance, est déterminé par la vitesse à laquelle la lumière la traverse. Il conçoit cette dernière comme un phénomène ondulatoire.

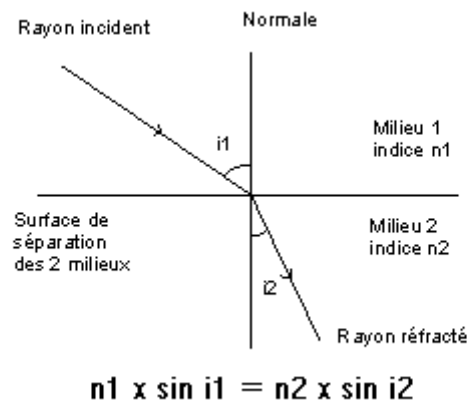


Figure 3                      Loi de Snell

Toute lentille fonctionne selon le même principe. La différence est que, dans une lentille, la surface de séparation est courbe. Il y a deux familles de lentilles, les lentilles convergentes, si des rayons de lumière parallèles l'atteignent, ils sont déviés de façon à converger en un point unique appelé « foyer ». La lentille divergente, si des rayons de lumière parallèles l'atteignent, ils sont déviés de façon divergente d'un foyer virtuel, d'où semblent venir tous les rayons.

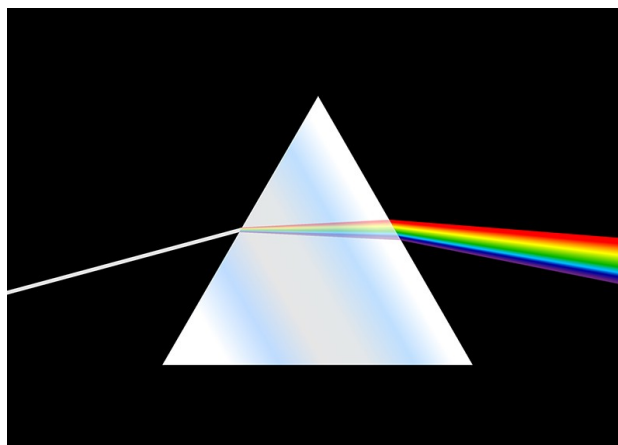


Figure 4 Réfraction d'ondes à travers un prisme

Une propriété particulière de la réfraction mérite d'être mentionnée. Le raisonnement mathématique de Huygens montre, dès le XVII<sup>e</sup> siècle, que si la lumière passe d'une substance à indice de réfraction élevé à une autre substance à indice de réfraction bas –du verre dans l'air par exemple – et si elle frappe la surface de séparation suivant un grand angle, elle est tellement déviée qu'elle ne peut plus s'échapper et qu'elle est complètement réfléchie. Ce phénomène est appelé « réflexion totale ».

Cette notion de réfraction nous semble importante car elle intervient avec de nombreuses situations telles que les vitres, le verre, un miroir ou même des lunettes.

## Polarisation

Les ondes lumineuses vibrent dans le plan perpendiculaire à leur propagation. Cependant, certaines matières transparentes produisent un effet sur la lumière qui les traverse. Les ondes sont obligées de suivre un axe de vibration (Figure 5 ). Ce phénomène est observé pour la première fois dans certains cristaux. Le changement dans le mouvement des ondes lumineuses provient de la structure moléculaire du cristal. Deux cristaux possédant une même structure moléculaire peuvent être placés face à face dans une certaine position et transmettre librement la lumière. Cependant si l'on tourne l'un d'eux, la lumière diminue jusqu'à un point où elle ne passe plus du tout à travers le second cristal. Grâce à ce principe simple, les verres « polaroïds » peuvent atténuer l'éblouissement. Ils suppriment toute la lumière non polarisée quand sa réflexion devient trop intense et ne laissent passer que les rayons qui se propagent dans un seul plan.

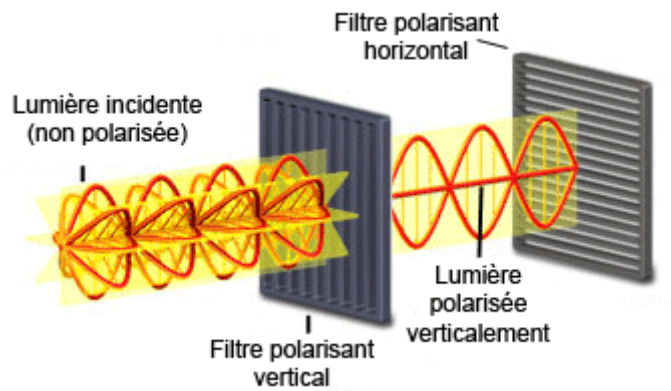


Figure 5 Phénomène de polarisation

La découverte de la polarisation par le physicien français Malus fait opter pour la théorie ondulatoire de la lumière car la théorie corpusculaire n'est pas capable d'expliquer l'interférence et la diffraction, considérées maintenant comme deux aspects différents du même phénomène.

## Dualité onde/corpuscule

Le grand théoricien anglais de la physique, James Maxwell identifie la lumière comme une partie de l'immense spectre continu des radiations électromagnétiques, perçue en tant que lumière naturellement parce que l'œil y est sensible. Le point commun mis en relief par Maxwell est que toutes les radiations électromagnétiques, lumière visible comprise, se déplacent dans le vide à la même vitesse, soit environ 300 000 kilomètres par seconde.

En 1905, Albert Einstein, appliquant la théorie quantique de Max Planck, suppose que la théorie de la lumière doit être incomplète et qu'elle possède certaines caractéristiques propres à la physique des particules.

Il développe un système mathématique pour expliquer comment un électron peut absorber une petite quantité d'énergie lumineuse, qu'il appelle « quantum » de lumière – plus tard dénommé « photon » - et obtenir ainsi l'énergie nécessaire pour changer d'état énergétique. Il trouve que, si l'énergie d'un photon est inversement proportionnelle à la longueur d'onde, plus celle-ci est petite, plus l'énergie est grande, de sorte qu'une lumière de courte longueur d'onde permet de donner aux électrons injectés des énergies élevées.

En 1923, le physicien américain Arthur Compton démontre que les photons possèdent un moment mais comme sa vitesse est  $c$ , la relativité impose que sa masse soit nulle. Ce qui est

un facteur important en faveur de la théorie d'Einstein. D'autres expériences suivent démontrant que, lorsque la lumière agit sur la matière, tous les phénomènes qui ont lieu ne peuvent être compris qu'en considérant que la lumière est formée de grains énergétiques distincts.

Ces découvertes troublent la physique théorique. L'hypothèse ondulatoire a remporté un succès spectaculaire et explique une grande variété de phénomènes (inférence, diffraction) qui ne peuvent pas être expliqués par la théorie corpusculaire. Cependant de nombreux phénomènes ne peuvent être compris qu'en termes de photons. Où est la vraie solution ?

La réponse vient d'une théorie physique complexe appelée « mécanique quantique » et développée par les grands noms de la physique moderne : Max Planck, Niels Bohr, Louis de Broglie, Werner Heisenberg, Erwin Schrödinger, Max Born et beaucoup d'autres. D'une manière générale, cette théorie montre comment une radiation électromagnétique peut posséder des caractéristiques à la fois ondulatoires et corpusculaires. Ces deux qualités sont des aspects complémentaires d'une seule réalité.

Au début du XXe siècle les théories d'Einstein sur la nature corpusculaire de la lumière donnent naissance au photon et à l'optique quantique. Les physiciens sont alors contraints d'admettre que la lumière présente à la fois les propriétés d'une onde et d'un corpuscule. À partir de là, Louis de Broglie considère, au travers de la mécanique ondulatoire, que si le photon peut se comporter comme un corpuscule, alors, à l'inverse, les corpuscules tels que les électrons ou les protons peuvent se comporter comme des ondes.

## Les grandeurs photométriques

Les principales grandeurs et unités photométriques et radiométriques sont résumées dans le tableau ci-dessous (Table 1 ). Elles sont utilisées dans le système international d'unité (SI).[XXII]

Grandeurs	Unités énergétiques	Unités photométriques (SI)
<b>Flux</b>	W	Lumen (lm)
<b>Intensité</b>	W sr <sup>-1</sup>	Candela (cd)
<b>Luminance</b>	W m <sup>-2</sup> sr <sup>-1</sup>	cd m <sup>-2</sup>
<b>Exitance</b>	W m <sup>-2</sup>	lm m <sup>-2</sup>
<b>Éclairement</b>	W m <sup>-2</sup>	lx

**Quantité de lumière**

J

lm s

Table 1 Grandeurs photométriques

Les rayonnements lumineux peuvent être considérés d'un point de vue énergétique (domaine de la radiométrie) ou d'un point de vue photométrique. Les grandeurs photométriques (flux, intensité, éclairement lumineux) ont été définies pour quantifier les grandeurs relatives aux quantités de lumière perçues par l'homme. Nous exposerons les courbes de la sensibilité de l'œil dans la partie relative aux différents types de visions.

**Eclairement lumineux Lux (lm/m<sup>2</sup>)**

L'éclairement lumineux (Figure 6 ) est la densité de flux lumineux tombant sur une surface. L'unité d'éclairement est le Lux : un Lux correspond à un lumen reçu par m<sup>2</sup>.

$$E = \frac{d\Phi}{dS} \quad \text{Équation 1}$$

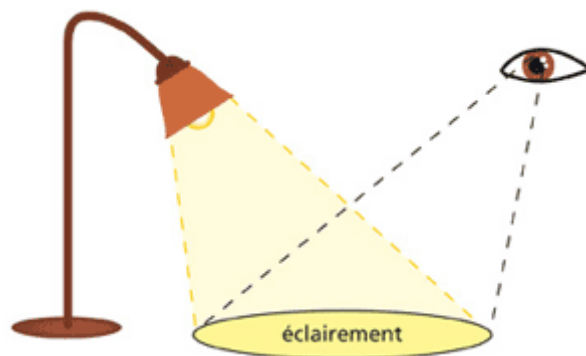


Figure 6 Illustration de la grandeur relative à l'éclairement

La mesure de l'éclairement :

Un filtre ayant la réponse de l'œil ( $v(\lambda)$ ) est placé au dessus d'une photodiode qui produit des charges proportionnellement au flux qu'elle reçoit, dans la mesure où sa surface sensible est définie une fois pour toutes lors de sa fabrication, le signal électrique qu'elle produit est donc proportionnel à l'éclairement qu'elle reçoit.

Si on définit l'angle  $\theta$  comme l'angle entre l'axe passant par la source et le centre de la surface, et un axe perpendiculaire à la surface, l'éclairement s'exprime de la façon suivante :



$$E = \frac{I}{D^2} \cdot \cos(\theta) \quad \text{Équation 2}$$

I = Intensité (W/sr ou Cd)

E = éclairement sur la surface (lux ou W/m<sup>2</sup>)

D = distance entre source et surface de mesure (m)

θ = angle entre la direction d'émission de la source et la perpendiculaire à la surface

L'éclairement sur une surface varie selon une fonction cosinus en fonction de son orientation par rapport à la source.

### Intensité lumineuse (cd) et le flux (lumen)

L'intensité lumineuse (Figure 7 ) est la grandeur photométrique faisant partie du système international d'unités (SI). Elle est toujours relative à une direction donnée et est exprimée en candela (cd). Elle est définie en 1979 par l'Office des Poids et Mesures comme :

La candela est l'intensité lumineuse, dans une direction donnée, d'une source qui émet un rayonnement électromagnétique de fréquence  $540 \cdot 10^{12}$  hertz et dont l'intensité énergétique dans cette direction est 1/683 watt par stéradian.

L'intensité lumineuse I et le flux lumineux Φ sont liés par la relation suivante :

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad \text{Équation 3}$$

dΩ désigne l'angle solide élémentaire sous lequel est émise la lumière issue d'une source ponctuelle. En toute rigueur l'intensité lumineuse est la limite de dΦ/dΩ quand dΩ tend vers zéro.

Un angle solide est le rapport entre la surface projetée d'un contour fermé sur une sphère et le carré du rayon de cette sphère. Par définition, l'angle solide total représentant l'ensemble d'une sphère équivaut à 4π. Pour un angle solide plus faible, nous avons: Angle solide = (dS/r<sup>2</sup>) en orientation perpendiculaire.

Cela revient à dire que l'intensité lumineuse représente la densité angulaire du flux lumineux dans une direction privilégiée de l'espace. Si l'intensité lumineuse est indépendante de la direction, ce qui se rencontre souvent, on obtient :

$$\Phi = \int_{\text{tout l'espace}} I d\Omega \quad \text{ou} \quad \Phi = \iint I \frac{dS}{r^2} \quad \text{Equation 4}$$

L'intensité lumineuse est la grandeur qui correspond à la quantité de lumière émise par une source ponctuelle dans un cône d'ouverture donnée. Elle se mesure en candela, qui est l'une des sept unités du système international.

Bien que les sources ponctuelles n'existent pas en réalité, une source de lumière réelle, vue d'assez loin est souvent considérée comme une source ponctuelle. En éclairage d'intérieur, la source des luminaires n'est pas ponctuelle. Mais l'intensité lumineuse peut encore être utilisée car elle facilite les considérations et les calculs, en particulier lorsqu'il s'agit de quantifier l'éclairement produit par une source sur une surface à une distance grande par rapport à la dimension de la scène.

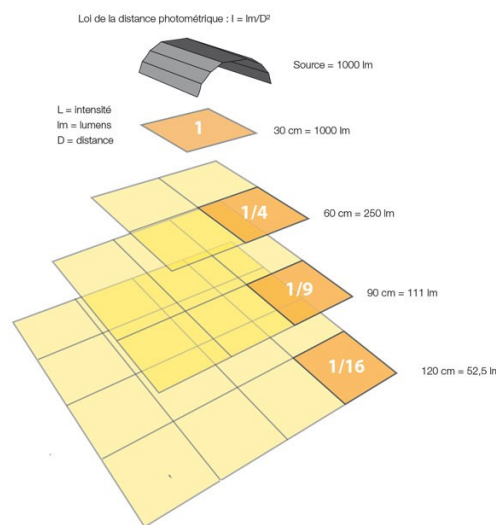


Figure 7 Illustration de la grandeur relative à l'intensité lumineuse

Il est cependant important de noter que les résultats obtenus sont faux si la surface est trop peu éloignée de la source. Il faut considérer environ une distance correspondant à 10 fois la plus grande dimension du luminaire. L'intensité est couramment employée pour définir la distribution angulaire du rayonnement d'un luminaire. On trace un diagramme photométrique en présentant les indicatrices du luminaire. Les indicatrices sont les graphes des intensités selon l'angle d'observation tracés en système de coordonnées polaires. Elles permettent d'identifier rapidement les spécificités d'un luminaire : directivité, axes de symétrie.

## La mesure de l'intensité lumineuse

Comme mentionné précédemment, l'intensité est une grandeur qui s'applique plus facilement aux sources ponctuelles. Ce sont des objets purement théoriques puisque toutes sources réelles présentent une certaine dimension géométrique. Mais cette grandeur est pratique et on l'obtient par une mesure d'éclairement en utilisant la formule suivante :

$$I = \frac{E \cdot D^2}{\cos(\theta)} \quad \text{Equation 5}$$

La mesure d'éclairement doit se faire à une distance d'une source de lumière telle que l'on puisse négliger ses dimensions et la considérer comme ponctuelle.

## La mesure du flux

Elle est parmi les grandeurs les plus difficiles à mesurer bien qu'elle soit la plus simple à comprendre. La difficulté réside dans le fait que les sources de lumières traditionnelles émettent leur lumière selon une géométrie d'émission qui leur est propre.

Si l'on cherche à mesurer le flux total rayonné par une ampoule classique opalisée par exemple, il faudrait mesurer l'intensité qu'elle rayonne dans toutes les directions afin de reconstituer son flux. Ceci peut se réaliser soit de façon directe par l'utilisation d'un photogoniomètre, soit de façon indirecte, en utilisant une sphère intégratrice (sphère d'Ulbricht).

La relation entre flux lumineux  $\Phi$  et intensité lumineuse  $I$ , fréquemment utilisée pour résoudre des problèmes simples est :

$$\Phi = I \cdot \Omega \quad \text{Equation 6}$$

où  $\Omega$  est l'angle solide.

Cette formule n'est valable que si l'intensité lumineuse est la même dans toutes les directions.

## Luminance ( $\text{cd/m}^2$ )

La luminance est le quotient de l'intensité lumineuse d'une surface par l'aire apparente de cette surface pour un observateur lointain (Figure 8 ). La luminance  $L$  (dans une direction donnée) d'une surface émettrice  $dA$  est définie comme le quotient de l'intensité lumineuse  $dI$  (exprimé en candela) émise par la surface apparente de  $d\Omega$  dans cette direction.

$N$  désigne le vecteur unitaire normal à la surface  $dA$ , et  $\Theta$  est l'angle que fait ce vecteur avec la direction d'observation.

$$L = \frac{d\Phi}{d\Omega dA \cos \theta} \quad \text{Équation 7}$$

La luminance est l'intensité d'une source étendue divisée par l'aire apparente. Elle est propre à la direction observée et s'exprime en cd/m<sup>2</sup>.

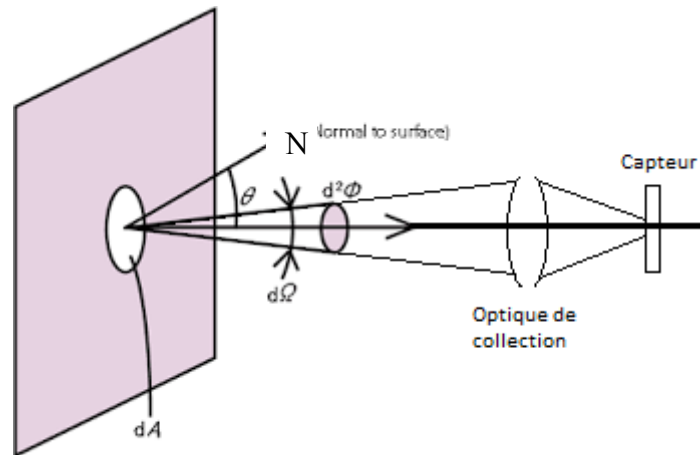


Figure 8 Illustration de la grandeur relative à la notion de luminance

#### La mesure de luminance

L'œil est, entre autres, un dispositif de mesure de luminance : il recueille la luminance de tous les points de son champ de vision. La reconstitution de cette cartographie de luminance produit les contrastes et donc l'image. Il en va de même pour l'appareil photographique en noir et blanc : les luminances des différents points d'une scène sont traduites en niveaux différents de gris.

#### Notion de type de sources :

Lorsque la lumière qui pénètre dans notre œil est constituée de plusieurs longueurs d'onde, elle est dite « *complexe* ». Nous ne sommes pas capables de les distinguer car les informations parvenant à notre cerveau pour chacune d'elles se superposent. L'œil fonctionne en intégrant une couleur composite. Par exemple, s'il reçoit simultanément des lumières monochromatiques vertes et rouges, le cerveau nous fournit l'information d'une couleur jaune. L'impression de jaune peut être également donnée par une lumière blanche privée partiellement de longueurs d'onde situées dans le rouge et le bleu.

En conséquence, à une longueur d'onde donnée, il est possible d'associer une couleur, mais l'inverse n'est pas vrai.

On parle de couleurs physiques lorsqu'un phénomène physique (réfraction, diffusion, diffraction, interférence) est à l'origine de la couleur sans que l'objet éclairé n'intervienne par sa nature chimique. Lorsque la nature chimique de l'objet ou de la substance joue un rôle, on parle de couleurs chimiques. Les colorants pour la teinture et les pigments pour la peinture en sont des exemples. Un colorant que nous percevons rouge (éclairé en lumière blanche) doit sa couleur au fait que le composé chimique dont il est constitué absorbe toutes les longueurs d'onde de la lumière blanche excepté celles situées dans le rouge qu'il renvoie. Cependant une telle séparation entre couleurs physiques et couleurs chimiques n'est pas satisfaisante. En fait la nature chimique intervient rarement seule dans l'aspect coloré que l'on perçoit. Très souvent des phénomènes physiques et physicochimiques sont simultanément impliqués.

De même, les couleurs qualifiées de physiques ne sont pas totalement indépendantes de la nature chimique de la matière. Par exemple, la répartition spatiale des couleurs par réfraction est liée à l'indice de réfraction, lequel dépend de la nature chimique du matériau. Il est donc préférable de raisonner en termes d'origine des couleurs sachant que souvent plusieurs causes peuvent intervenir simultanément. La lumière qui pénètre dans notre œil provient :

- soit d'une source « *primaire* », c'est-à-dire produisant elle-même de la lumière par incandescence ou luminescence
- soit d'une source secondaire, c'est-à-dire d'une substance ou d'un objet éclairé par une source primaire.

Dans les deux cas, la couleur perçue dépend de la composition spectrale de la lumière reçue par l'œil et de sa sensibilité. Dans le second cas, intervient en outre la façon dont la substance ou l'objet modifie le spectre de la lumière qu'il reçoit : réfraction, diffraction et interférences, interférences sans diffraction, absorption, absorption suivie d'émission (photoluminescence).

Deux classes de couleurs sont donc à considérer selon leur origine :

- *classe I* : couleurs de sources primaires de lumière (incandescence ou luminescence)
- *classe II* : couleurs de sources secondaires de lumière (substances ou objets éclairés)

Deux sources de même flux énergétique mais de longueur d'onde différente vont produire deux sensations différentes de luminosité. Ceci met en évidence le fait que les grandeurs énergétiques de la physique sont insuffisantes aux problématiques de la caractérisation des sources de lumière. Pour tenir compte de la sensibilité de l'œil et ainsi quantifier une puissance rayonnée en relation directe avec la sensation de luminosité produite, une nouvelle

grandeur a été créée. Il s'agit du flux lumineux qui s'exprime en lumens (lm). Cela donne lieu à deux branches complémentaires de la science de la caractérisation du rayonnement :

- La radiométrie qui s'attache à l'étude et à la quantification énergétique du rayonnement.
- La photométrie qui décrit les propriétés de la lumière en tant que rayonnement dans la gamme des longueurs d'ondes visibles, en tenant compte de la sensibilité de l'œil humain.

En 1924, la CIE établit la fonction  $V(\lambda)$  qui correspond à la vision de l'œil en vision photopique. Cette courbe de sensibilité de référence est utilisée pour la définition du lumen.

## Synthèse des couleurs

### Synthèse additive

Toutes les couleurs peuvent être reconstituées visuellement en superposant en proportions convenables trois lumières monochromatiques, à condition qu'aucune d'entre elles ne puisse être obtenue par superposition des deux autres. Ces couleurs sont appelées « primaires ». C'est le principe de la synthèse additive des couleurs nommée trichromie additive (Figure 9 ). Le choix des couleurs primaires est arbitraire mais on a intérêt à les choisir aussi différentes que possible, c'est-à-dire aux extrémités du spectre visible (rouge et bleu) et en son centre (vert).

La superposition de ces trois lumières donne de la lumière blanche et la superposition de deux d'entre elles donne du jaune, du cyan et du rouge pourpre (*magenta*) :

Vert + Rouge = Jaune

Bleu + Vert = Cyan

Bleu + Rouge = Magenta

Bleu + Vert + Rouge = Blanc

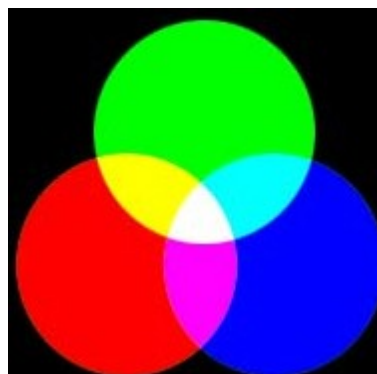


Figure 9

Synthèse additive des couleurs

Cette synthèse additive est la base du fonctionnement des écrans de télévision (procédé RGB) qui comportent des luminophores émettant dans le rouge, le vert et le bleu avec des intensités variables. Les vidéoprojecteurs mettent également à profit la superposition de ces trois lumières primaires.

La synthèse de la lumière blanche est effectuée par les lampes ou tubes fluorescents via la superposition des fluorescences émises dans le rouge, le vert et le bleu par trois espèces fluorescentes spécialement choisies pour que l'œil ait une impression de blanc.

### Synthèse soustractive

Les mélanges de deux solutions colorées (constituées de composés chimiques ne réagissant pas ensemble) ou de deux poudres fines de pigments colorés soustraient conjointement un certain nombre de longueurs d'onde du spectre de la lumière blanche, d'où l'apparition de nouvelles couleurs. Ils sont dénommés mélanges soustractifs par opposition aux mélanges de lumières colorées qui sont additifs. En superposant plusieurs filtres colorés adéquats, chacun d'eux ne laissant passer qu'un certain domaine de longueur d'onde, on obtient la synthèse *soustractive* de diverses couleurs. Trois filtres suffisent pour reproduire toutes les couleurs. Ils correspondent à trois couleurs primaires qui sont arbitraires mais aucune des trois ne doit pouvoir être synthétisée par soustraction des deux autres. Les couleurs primaires ou fondamentales les plus utilisées sont le jaune, le magenta et le cyan (Figure 10).

La synthèse soustractive des couleurs est couramment mise à profit en photographie, en imprimerie et en peinture (trichromie, quadrichromie par procédé CMLN - Cyan, Magenta, Jaune, Noir).

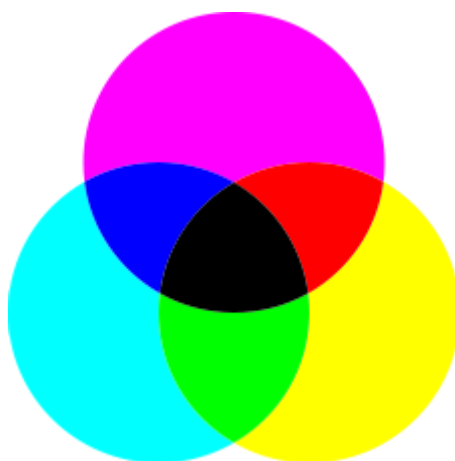


Figure 10 Synthèse soustractive des couleurs

## Température de Couleur Proximale (TCP)

### Définition

On utilise souvent ce paramètre pour définir la colorimétrie d'une source blanche et préciser si le type de lumière émise est plutôt proche de celui d'une bougie (blanc très chaud légèrement orangé) ou à l'opposé de celui d'un ciel nuageux (blanc plus froid).

Nous utilisons aussi l'acronyme CCT qui vient de Correlated Colour Temperature, de l'équivalent anglais. On emploie les mots de « température de couleur proximale » pour CCT et cet abus de langage a pu faire oublier l'origine de ce paramètre.

### Notions de température de couleur proximale

Au centre du diagramme de chromaticité (définie ultérieurement), on distingue une zone de blancs assez étendue et présentant ainsi des teintes plus ou moins marquées. La notion de lumière blanche est extrêmement ambiguë : la lumière blanche utilisée dans un salon n'est pas la même que celle d'un lieu de travail. On qualifie chacune des teintes de ces blancs par des sensations associées (Figure 11).

Le blanc chaud, pour des ambiances confortables et feutrées

Le blanc froid, pour des ambiances stimulantes et des zones de travail.

Le blanc neutre, entre les deux

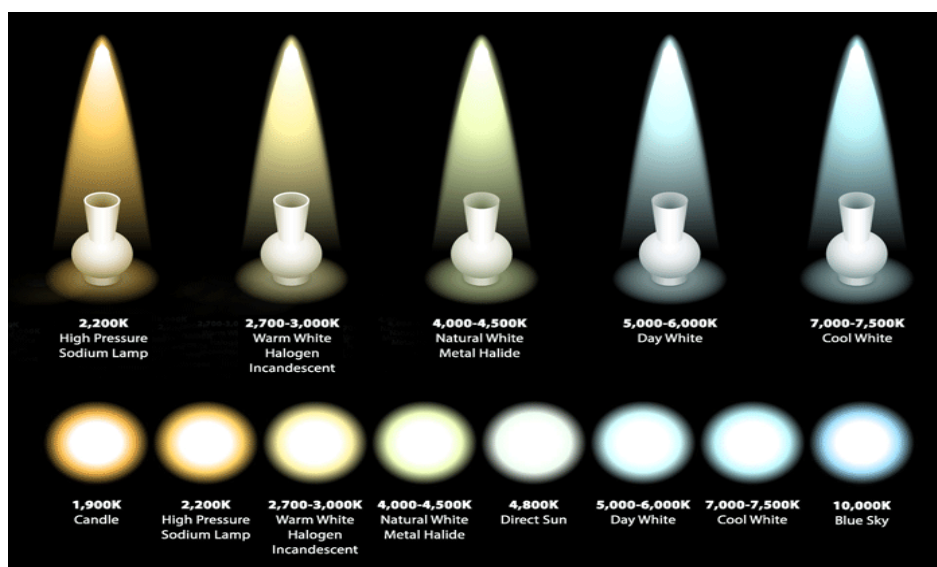


Figure 11 Variation de la température de couleur



Historiquement, les hommes ont toujours été éclairés par des sources thermiques issues de la flamme du feu, du soleil, d'un filament d'ampoule à incandescence. Culturellement les notions de blanc varient entre le blanc chaud et le blanc froid.

Ces sources thermiques ont la particularité de présenter un rayonnement proche d'un objet physique théorique appelé *corps noir*. Le nom corps noir a été introduit par le physicien Gustav Kirchhoff en 1862. Il s'agit d'une description quantique du rayonnement d'un corps idéal à l'équilibre thermique à une température donnée. Cette description physique permet de calculer de manière exacte le spectre d'un corps noir pour n'importe quelle température. Ainsi à chaque température, on peut associer le spectre d'un corps noir. D'après la loi de Planck, tout corps noir rayonne une énergie électromagnétique dépendant de la température de ce corps. La température d'une couleur perçue s'exprime en Kelvins (K). Pour un blanc, il s'agit de la température à laquelle il faudrait chauffer un corps noir pour obtenir la même teinte (Figure 12 ).

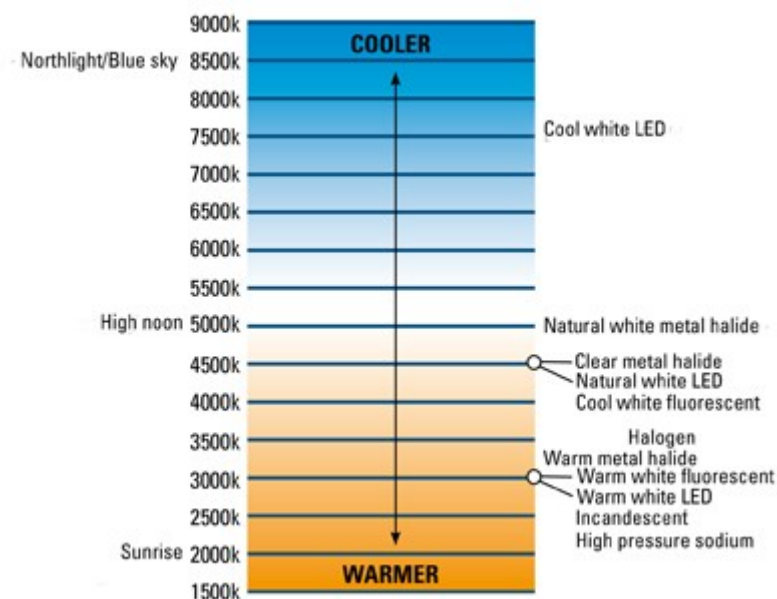


Figure 12 Gamme des températures de couleur

La notion de blanc chaud/froid est liée à un ressenti de confort et une perception d'ambiance. Elle varie en opposition avec la notion de température de couleur. En effet, un blanc chaud est obtenu pour des températures de couleur faibles (inférieures à 3 500 K) et un blanc froid pour des températures de couleur élevées (supérieures à 4 500 K).

Depuis le développement de sources non thermiques (tubes fluorescents en particulier), les blancs n'ont pas forcément un point de couleur situé sur la courbe du corps noir. La notion de

température n'a pas vraiment de sens dans ce cas. Mais on maintient cette notion (qu'il conviendrait d'appeler température de couleur proximale) comme la température de couleur du point le plus proche sur la courbe du corps noir. Il est important de noter que, bien que la différence de teinte entre un blanc froid et un blanc chaud soit significative et acceptée comme des blancs par l'œil humain, tout blanc s'éloignant trop de la courbe du corps noir semble inhabituel et produit un sentiment désagréable (sensation de blanc rosé, blanc verdâtre, blanc jaunâtre). D'où la nécessité de produire un blanc confortable pour les sources non thermiques comme les ampoules à décharges et les DEL. Cependant des études récentes[XXI][XXXI][XL] montrant que des sources ayant des coordonnées trichromatiques sous la courbe de Planck (teinte rose) semblent être moins dépréciées que celles qui sont au dessus. La température de couleur proximale (CCT), est la température de couleur la plus proche du point observé de l'espace des couleurs. On dit qu'une source de lumière possède une température de couleur proximale (5000 K, par exemple) quand son spectre d'émission s'approche du spectre d'un corps noir qui serait chauffé à cette température de 5000 K. Mais ce n'est qu'une approximation qui, dans certains cas, peut être relativement éloignée de la réalité car il existe pour une même température de couleur proximale plusieurs choix de coordonnées chromatiques. Ainsi deux DEL ayant des températures de couleur identiques peuvent avoir des coordonnées trichromatiques différentes. Pour quantifier l'écart entre les coordonnées trichromatiques et la courbe de Planck on s'intéresse à la distance ( $\Delta_{uv}$ ). Par exemple, l'axe des couleurs vert-magenta étant un axe perpendiculaire à la courbe des corps noirs, toute source pourrait avoir une composante verte ou magenta plus ou moins présente et ce, quelle que soit la CCT associée. Une source avec une  $\Delta_{uv}$  importante, sera une source dont les coordonnées colorimétriques sont éloignées de la courbe des corps noirs.

Dans le cadre de cette thèse nous fixerons trois groupes de sources classées ainsi : les blancs chauds (warm White) pour les sources ayant une CCT comprise entre 2000K et 3500K. Les sources de cette catégorie ont une dominante dans les teintes jaune orangées.

Les blancs neutres, allant des CCT de 3500 K à 5500 K.

Les blancs froids, qui ont une CCT supérieur à 5500k. Ils ont une dominance bleutée.

## L'efficacité lumineuse

Les radiations lumineuses issues d'une source ne représentent qu'une fraction de l'énergie que celle-ci consomme. La quantité totale d'énergie cédée à l'extérieur, sous toutes les formes

possibles : calorifique, électromagnétique, chimique, par seconde dans toutes les directions est le flux énergétique  $K$  exprimé en watt. Le rendement lumineux ou l'efficacité lumineuse est le rapport du flux lumineux sur le flux énergétique. Il s'exprime en lumen par watt. Dans le cas d'un luminaire ou d'une ampoule, on peut considérer qu'il est égal à la totalité du flux lumineux émis divisé par l'ensemble de l'énergie électrique consommée.

Par définition, le rendement lumineux maximal est de 683 lm/W, ce qui correspond à l'énergie du faisceau lumineux en lui-même.

L'efficacité lumineuse d'un rayonnement se définit par le rapport entre son flux lumineux  $\Phi_v$  et son flux énergétique  $\Phi_e$  :

$$K = \frac{\Phi_v}{\Phi_e} \text{ Équation 8}$$

Le flux énergétique  $\Phi_e$  peut être vu sous deux aspects: soit le flux énergétique absorbé par le composant émetteur de lumière, soit de manière plus globale par le luminaire, incluant les pertes liées à l'électronique.

# Vision humaine

L'œil est le dispositif optique qui permet de retranscrire l'environnement des rayonnements lumineux. Mécaniquement parlant, l'œil est un instrument qui rassemble les rayons lumineux et les dirige vers sa surface postérieure pour y former une image nette. Il est composé d'un certain nombre d'éléments que nous allons aborder dans leur ensemble.

Dans l'œil humain, la mise au point et le contrôle de la lumière représentent des phénomènes complexes. Il n'est pas simple d'obtenir une image nette sur la rétine.

Par ailleurs, la couleur est un paradoxe qui a été remarquablement bien expliqué par tous les travaux des 20<sup>ème</sup> et 21<sup>ème</sup> siècles. La couleur existe dans la lumière qui paraît à l'œil humain. Certains objets, tel que les bulles de savon, les arcs-en-ciel sont dépourvus de pigment coloré, pourtant ces objets nous semblent colorés. La symphonie des diverses teintes que nous voyons autour de nous, ne signifie pas que nous vivons dans un monde d'objets colorés. Elle signifie seulement que la surface de ces objets réfléchit une fraction déterminée du spectre de la lumière qui les frappe.

Parmi toutes les espèces vivantes, l'homme possède un système visuel très complexe. Ce système comprend les yeux et les régions du cerveau qui y sont reliées. Cela lui permet de comprendre et d'organiser des éléments de plus en plus compliqués de son milieu. Ce triomphe de la vision est obtenu par un ensemble d'organes dont le premier ancêtre, il y a trois cents millions d'années, n'était qu'une simple tache de détection lumineuse sur le corps d'un animal. Au cours de son évolution, le système visuel a évolué. Il est devenu de plus en plus spécialisé.

## Principe de l'œil

La lumière pénètre dans la cornée, membrane rigide et transparente sur la partie antérieure de l'œil (Figure 13 ).[XXII] A cause de sa forme bombée, la cornée joue le rôle de la lentille convexe d'un appareil photographique et rassemble les rayons de la lumière. Derrière la cornée, un rideau circulaire coloré, l'iris, s'ouvre et se contracte comme le diaphragme de ce même appareil pour régler la quantité de lumière qui pénètre dans l'œil. Le petit trou rond, au centre de l'iris, est appelé pupille. La lumière la traverse et pénètre dans un corps transparent, le cristallin, dont la forme peut être modifiée par un muscle ciliaire, qui lui est relié par un

réseau de fibres minuscules. Le contrôle de la forme du cristallin par ses muscles a pour but de mettre au point avec précision l'image sur la rétine, cette couche photosensible placée au fond de l'œil et qui couvre environ 65% de la surface interne. Des cellules photosensibles y convertissent l'énergie lumineuse en signaux qui sont transportés vers le cerveau par le nerf optique. Au milieu de la rétine, se trouve une petite dépression appelée « fovéa », c'est là que la vision est la plus nette. La choroïde et l'iris, qui sont très riches en vaisseaux sanguins, nourrissent cette portion de l'œil de même que l'humeur aqueuse, ce liquide qui irrigue la partie antérieure de l'œil entre la cornée et le cristallin. L'humeur vitrée, gelée transparente qui remplit l'intérieur du globe oculaire, un peu comme l'air remplit un ballon, aide l'œil à conserver sa forme. Les muscles qui permettent de bouger l'œil viennent de la sclérotique (revêtement extérieur résistant). La conjonctive, membrane protectrice souple, relie la partie antérieure de l'œil à l'intérieur des paupières.

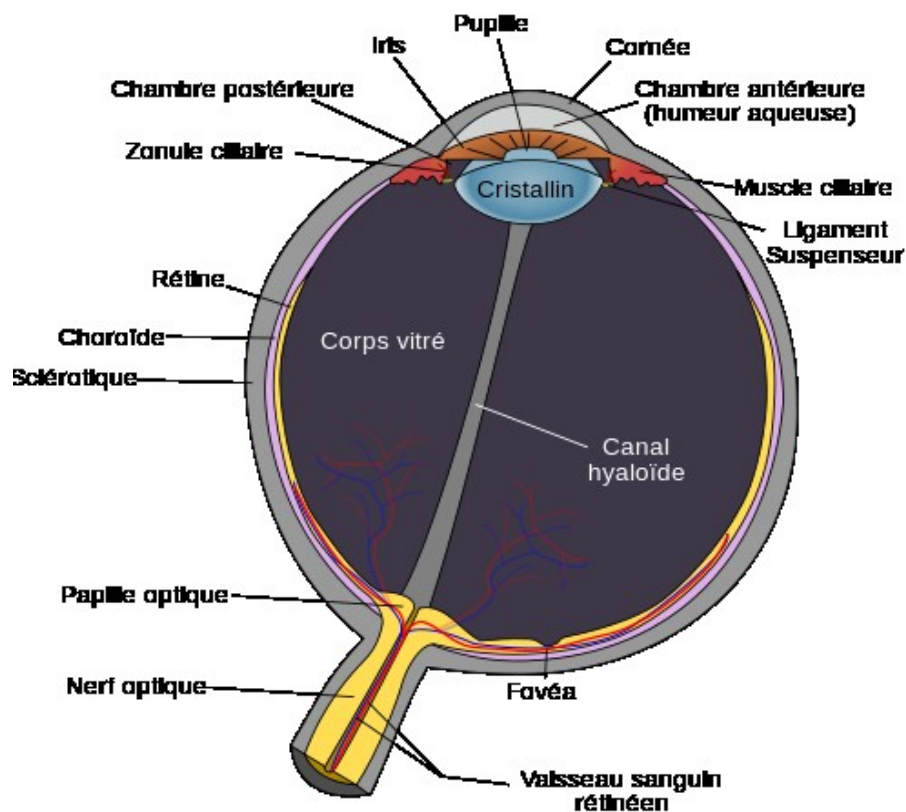


Figure 13 Composition schématique d'un œil

## Physiologie de l'œil

Dans l'œil humain quatre éléments doivent fonctionner simultanément pour obtenir une image nette : la cornée, le liquide appelé « humeur aqueuse », le cristallin et la substance à consistance gélatineuse appelée « corps vitré » ou « humeur vitrée » [XXXIX].

Le contrôle de la quantité de lumière qui pénètre dans l'œil est entièrement assuré par l'iris, qui signifie en grec « arc-en-ciel ». L'iris est la partie la plus visible de l'œil. Il montre la couleur de celui-ci (bleu, brun, gris ou vert). L'iris n'est qu'un diaphragme de muscles circulaires et radiés. Ces muscles, en se contractant ou en se relâchant, peuvent réduire ou agrandir la taille de l'orifice qui laisse passer la lumière : la pupille.

### Pupille

Elle n'a pas l'aspect d'un trou mais ressemble à une tache pleine et noire parce que derrière son ouverture se trouve la partie postérieure sombre de l'œil. Le diamètre de cet orifice est adapté automatiquement aux diverses intensités lumineuses grâce à des signaux nerveux envoyés aux muscles de l'iris. Dans l'obscurité, l'ouverture peut être aussi grande que la section d'un crayon. A la lumière solaire violente, la pupille peut être réduite à la taille d'une tête d'épingle. L'ouverture n'est jamais complètement close. Quand la lumière trop intense devient pénible, les paupières se ferment automatiquement.

Des signaux du mécanisme de mise au point de l'œil affectent aussi la taille de la pupille. Il existe également des facteurs émotionnels qui influencent légèrement la taille de la pupille comme regarder une photographie attrayante. Une fois que l'iris a admis la quantité de lumière nécessaire, les rayons sont déviés afin de mettre l'image au point sur la rétine. C'est là qu'entrent en jeu les éléments cités ci-dessous.

### Cornée

La cornée est recourbée, claire et transparente. Elle produit la première réfraction qui est aussi la plus importante. Elle réduit la vitesse de la lumière d'environ 25% et la dévie vers le centre avec une précision mathématique malgré l'indice de réfraction important de la cornée. Lorsque les rayons lumineux sortent de la surface intérieure de la cornée, ils sont dirigés vers l'intérieur et tendent à se rapprocher l'un de l'autre. Ainsi rassemblés, ils rencontrent l'humeur aqueuse qui occupe l'espace entre la cornée et l'iris. Ce liquide est pratiquement

incolore. Il est optiquement adapté à la cornée, c'est-à-dire qu'il réfracte les rayons lumineux à peu près dans la même proportion. Ainsi, ces rayons continuent leur chemin plus ou moins parallèlement à travers le liquide ou, si l'on préfère, ils en sortent à peu près comme ils y sont entrés. La mise au point n'est donc pas faite à cette étape. L'élément qui rend l'extraordinaire flexibilité de la vision humaine est un mécanisme beaucoup plus compliqué lié au cristallin ou lentille [LXIII].

## Cristallin

Cette lentille est une fine structure cristalline qui a environ la taille et la forme d'un petit haricot. Comme toutes les lentilles, c'est un dispositif pour réfracter. Cependant elle diffère des lentilles de verre de deux façons :

D'abord, elle n'est pas composée d'une structure uniforme comme un simple morceau de verre. Elle consiste en une accumulation d'environ 2 200 couches infiniment fines (lamelles). Ces couches sont superposées comme des pelures d'oignons. A mesure que la lumière traverse chacune d'elles, celle-ci subit une légère réfraction de sorte que la modification du chemin parcouru par la lumière est chaque fois microscopique. L'effet total est tout à fait progressif.

La seconde caractéristique de la lentille de l'œil, c'est qu'elle n'est pas rigide mais extrêmement souple au contraire. Dans l'œil humain, la distance entre le cristallin et la rétine est fixe et inchangeable. Contrairement aux yeux de beaucoup de poissons par exemple qui, pour voir un objet proche, sortent leurs yeux de façon à ce que la lentille s'éloigne de la rétine. Pour mettre au point des objets éloignés, l'œil est aplati afin de rapprocher la lentille de la rétine.

En passant d'une forme relativement plate à une autre plus convexe, la lentille humaine augmente son pouvoir de réfraction et donc sa capacité de dévier les rayons lumineux (Figure 14 ).

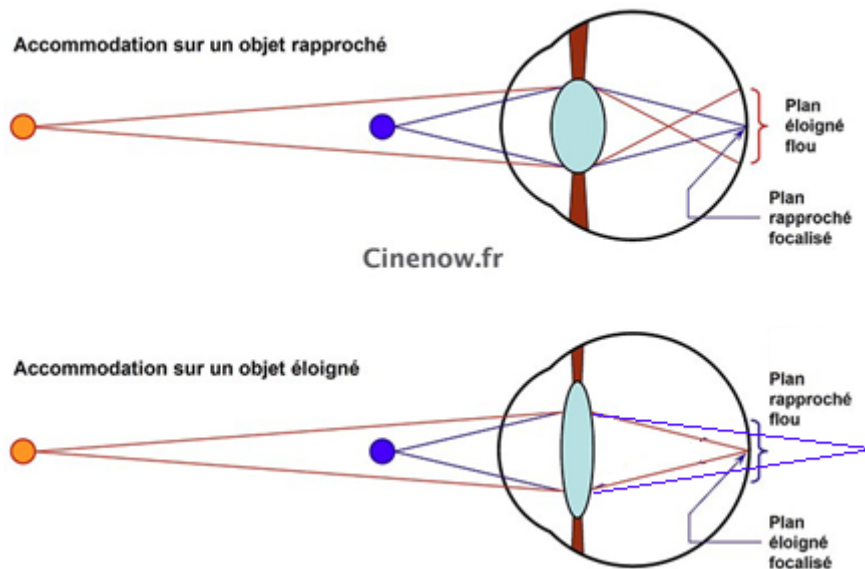


Figure 14 Mécanisme d'accommodation de l'œil

Les rayons d'une source lumineuse très proche de l'œil sont très divergents. Ils s'éloignent encore les uns des autres lorsqu'ils atteignent l'œil et le pouvoir réfracteur de la cornée n'est pas suffisant pour les rassembler sur la rétine. Les muscles se contractent alors afin de changer la forme de la lentille. Une surface plus courbée étant présentée à la lumière qui la traverse, les rayons sont plus fortement déviés.

D'autre part, les rayons lumineux d'une source éloignée sont presque parallèles lorsqu'ils entrent dans l'œil. Par conséquent, ils n'ont pas besoin d'être rapprochés autant pour converger en un point sur la rétine. La cornée seule peut généralement modifier suffisamment leur trajectoire. En cas de nécessité, la lentille s'aplatit et diminue son pouvoir réfracteur. Ce processus de modification de la forme de la lentille afin d'adapter l'œil à la vision proche ou lointaine est appelé « accommodation ». Celle-ci s'effectue presque instantanément et permet à l'homme de passer de l'observation d'un objet proche à un autre éloigné sans problème de mise au point. Cependant, il ne faut pas oublier que l'homme n'est capable de mettre au point avec netteté que sur une seule chose à la fois. Quand nous regardons autour de nous des objets dans une pièce ou dans la rue, la lentille doit mettre au point d'une distance proche à une distance moyenne et à une distance éloignée avec facilité et rapidité, si bien que l'homme ne se rend pas compte du fait que son cerveau commande un changement de mise au point.

L'accommodation est contrôlée par le corps ciliaire, anneau musculaire qui entoure la lentille. Par contraction ou allongement, ces muscles changent la forme du cristallin. Ce changement est relativement faible, même quand il doit servir à mettre au point des distances les plus



proches aux plus éloignées. Le changement maximum en épaisseur de la lentille n'est que d'un demi-millimètre environ.

Une fois que la convergence de la lumière a été soigneusement réglée par la lentille, les rayons passent à travers l'humeur vitrée, cette substance claire et gélatineuse qui remplit entièrement l'espace entre le cristallin et la rétine. Cet espace représente environ les deux tiers du volume complet de l'œil. Elle est adaptée au cristallin : comme elle a environ le même indice de réfraction que ce dernier, elle ne modifie pas la direction des rayons qui en sortent.

En plus de la cornée, de l'humeur aqueuse, du cristallin et de l'humeur vitrée, il y a un autre mécanisme qui joue un rôle dans la formation d'une image nette sur la rétine. Cette structure est composée de trois ensembles de muscles qui permettent de mouvoir le globe oculaire verticalement et horizontalement.

Selon ce qu'une personne regarde, l'œil se déplace en longs mouvements progressifs de balayage ou en petits sauts brusques. L'œil tend à ne pas rester immobile. Il possède un système compliqué pour coordonner ces mouvements. Chacune des actions principales de l'œil (contrôle de la lumière, mise au point, mouvements) est liée aux autres par un système complexe de circuits nerveux entrelacés, coopérant tous pour que les erreurs soient corrigées par des signaux venant des autres parties.

Quand, par exemple, l'œil regarde vers un objet et que l'image tombe sur la partie périphérique de la rétine où la vision est floue, des muscles reçoivent l'ordre de bouger l'œil de telle façon que l'image soit centrée pour obtenir une vue nette. Simultanément, un autre système de messages atteint les muscles ciliaires qui ajustent l'épaisseur du cristallin pour obtenir plus de netteté. Des circuits de contrôle identiques modifient le diamètre de la pupille pour régler la quantité de lumière lorsque l'illumination est trop faible ou trop violente. Il y a même un circuit automatique qui rétracte la paupière lorsque l'œil regarde vers le haut.

Tous ces mouvements et mises au point sont réalisés simultanément par les deux yeux.

Bien qu'il soit plus simple et justifiable de décrire le fonctionnement de « l'œil », le système visuel humain est avant tout binoculaire. La structure du système binoculaire humain diffère de celui de toutes les autres espèces, à la fois par sa position et par sa mobilité. Il est binoculaire dans un sens très particulier : il est stéréoscopique. Les images des deux yeux se combinent pour produire une impression de profondeur et de relief.

Les yeux de l'homme fonctionnent toujours ensemble et leurs mouvements sont coordonnés même quand ils sont opposés par exemple lorsqu'ils se tournent légèrement vers l'intérieur pour une mise au point de très près. Si l'un des yeux est caché, il continue à se mouvoir en harmonie avec l'œil ouvert.

## Photorécepteurs

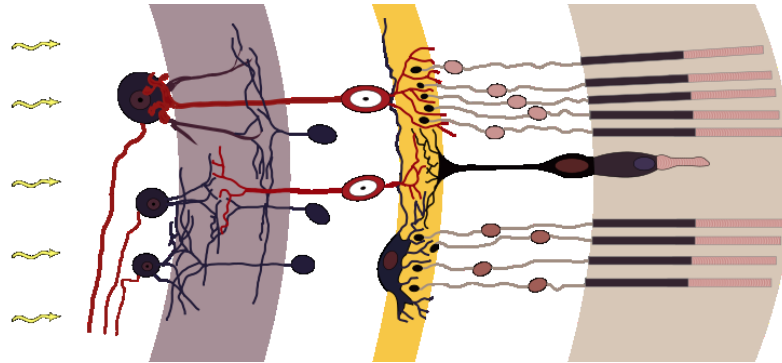


Figure 15 Composition des photorécepteurs de la rétine

La destination finale des rayons lumineux focalisés par la cornée et le cristallin est un ensemble de cellules photosensibles (Figure 15 ) à l'arrière de la rétine. Il y a deux types de cellules : les bâtonnets et les cônes ainsi appelés à cause de leur forme. Les cônes pour la vision diurne et colorée dont on distingue trois sous-types L, M et S (ou rouge, vert, bleu), en fonction de leur sensibilité spectrale, et les bâtonnets pour la vision crépusculaire et nocturne en "noir et blanc".

Les cônes définissent certaines terminaisons synaptiques avec des cellules horizontales et des cellules bipolaires. Ces synapses revêtent un aspect particulier et sont dites en ruban ("ribbon synapses"). Elles se composent d'invaginations du pédicule où se logent les dendrites de deux cellules horizontales et de deux à cinq cellules bipolaires. Au sein du compartiment intracellulaire, se trouve une densité présynaptique autour de laquelle s'accumulent des vésicules emplies de glutamate. Le ruban synaptique est une structure spécialisée qui joue un rôle important pour guider les vésicules de glutamate.

Les cônes contiennent aussi des pigments photosensibles qui rendent possible la distinction des couleurs. La plus grande concentration de cônes se trouve dans la fovéa, endroit où l'on obtient les images les plus nettes.

La terminaison axonale des bâtonnets, de forme sphérique, est connue sous le nom de sphérule. C'est l'équivalent du pédicule du cône mais en plus petit (3-5  $\mu\text{m}$  de diamètre contre 8-10  $\mu\text{m}$ ). La sphérule comporte aussi des rubans synaptiques dirigés vers les invaginations contenant des dendrites de cellules horizontales et de cellules bipolaires.

Chaque photorécepteur synthétise dans son segment interne et stocke dans la membrane plasmique de son segment externe, des pigments composés d'une protéine porteuse qui détermine la sensibilité spectrale et qui est couplée à une molécule chromophore qui capte les photons.

Dans le cas des bâtonnets, le pigment correspond à la rhodopsine constituée par une protéine, l'opsine, et le chromophore : 11-cis rétinale, aldéhyde de la vitamine A. Le maximum de la fonction de sensibilité spectrale des bâtonnets se situe autour de 500 nm (de couleur verte)(Figure 16 ).

Pour les cônes, les pigments sont les : cyanolabe (S), chlorolabe (M), et érythrolabe (L), respectivement sensibles à la lumière de longueur d'onde maximale : 440 nm (bleu), 530nm (vert) et 560 nm (rouge))(Figure 16 ). Chez l'être humain, il y a environ 5 à 7 millions de cônes, et 120 millions de bâtonnets.[XXII]

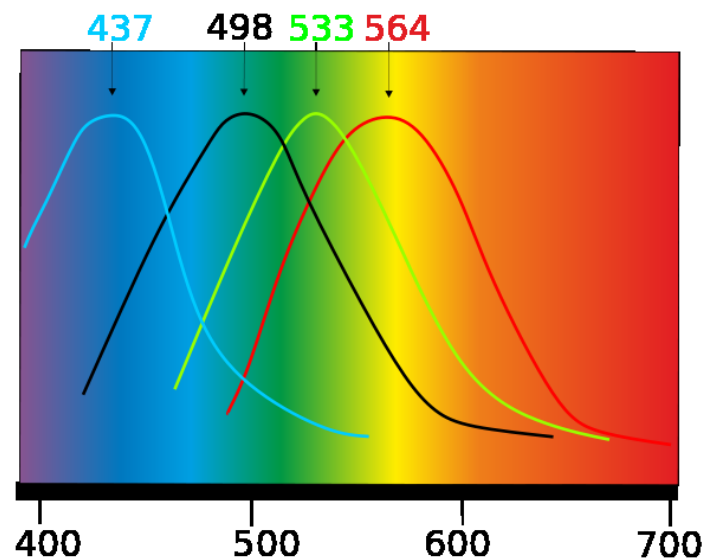


Figure 16 Sensibilité spectrale des photorécepteurs

Cônes (C) et bâtonnets (B) s'opposent quant à la propriété de leurs pigments visuels: sensibilité forte (B) et faible (C), acuité forte (C) et faible (B), et adaptation forte (B) et faible (C) (Table 2 ).

Propriétés des pigments visuels		
	Cônes	Bâtonnets
sensibilité	faible	forte
acuité	forte	faible
adaptation	faible	forte

Table 2 Propriétés des cônes et bâtonnets

Ces photorécepteurs transforment le signal lumineux (photons) en signaux électriques puis chimiques par l'intermédiaire d'un neurotransmetteur, le glutamate. Les uns et les autres renferment des produits chimiques qui sont modifiés par l'action de la lumière. C'est là que se trouve la transition entre la lumière et les signaux nerveux.

Il existe quelque 130 millions de bâtonnets et de cônes sur la rétine. Ces derniers servent pour la vision diurne et peuvent envoyer les signaux les plus intenses dirigés au cerveau qui les interprète selon une perception précise.

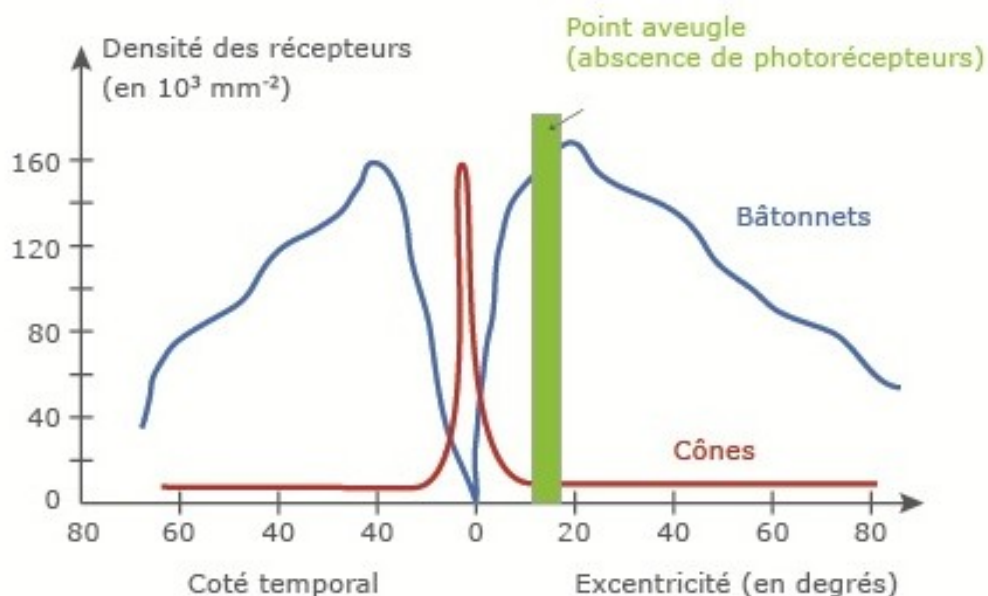


Figure 17 Répartition des photorécepteurs sur la rétine

En dehors de la fovéa, les bâtonnets dominant (Figure 17 ). Ceux-ci, utilisés pour la vision nocturne, ne peuvent détecter la couleur. Ils n'enregistrent qu'en noir et blanc et ne donnent que des images floues. C'est pourquoi les scènes nocturnes apparaissent moins distinctes et semblent se réduire à différentes intensités de gris. En effet, les cônes qui produisent la vision nette et la perception des couleurs ne fonctionnent pas et le processus complet de vision doit être réalisé par les seuls bâtonnets. Comme ces derniers sont localisés à l'extérieur de la fovéa, on ne peut voir un objet peu lumineux (étoile par exemple) dans l'obscurité qu'en le regardant légèrement de côté et non directement en face.

### Mécanisme primaire de la vision

Dans le mécanisme de la vision, l'absorption d'un photon déclenche une chaîne de processus biochimiques et électrochimiques au sein de la cellule photo-réceptrice, provoquant sa dépolarisation, d'où une impulsion électrique transmise au cerveau. Les couleurs sont transmises séparément au cortex visuel sous forme d'un débit d'une dizaine d'impulsions électriques par seconde d'amplitude de quelques dizaines de millivolts [LXXI].

Le rétinal, molécule photosensible du type polyène, se lie à l'opsine, protéine du groupe aminoacide (lysine). L'ensemble constitue la rhodopsine. Lorsque le rétinal absorbe un photon, l'énergie acquise lui permet de changer de forme : en quelques picosecondes la molécule passe de la forme « cis » à la forme « trans » (isomérisation). Chaque photon absorbé produit une rhodopsine excitée qui provoque l'activation d'une phosphodiesterase. Cette enzyme hydrolyse des centaines de molécules de GMPc. Le rôle de ces molécules est de maintenir ouverts les canaux ioniques du sodium. Quand elles sont hydrolysées, les canaux se ferment et le passage de millions d'ions sodium est bloqué, ce qui donne naissance à une impulsion électrique. Ainsi l'absorption d'un photon est considérablement amplifiée. Le rétinal intervient dans les trois types de cônes. Pourtant ils ont une sensibilité différente en fonction de la longueur d'onde. En effet, les opsines auxquelles le rétinal est lié diffèrent par la séquence des acides aminés. Le microenvironnement du rétinal s'en trouve modifié, d'où une différence entre les spectres d'absorption des trois types de cônes.

## Les types de vision

### Photopique

La vision photopique présente la vision dite de jour. Elle est effective pour un environnement au-dessus de  $10 \text{ cd/m}^2$ . Elle utilise principalement les cônes qui permettent la vision des couleurs.

### Scotopique

La vision scotopique définit la vision de nuit. Elle utilise principalement les bâtonnets de la rétine qui ont une sensibilité plus grande que les cônes, mais ne permettent pas une bonne distinction entre les couleurs : « la nuit tous les chats sont gris »

### Mésopique

La vision mésopique est la vision entre la vision photopique et la vision scotopique. Elle intervient dans des environnements de clair-obscur (Figure 18 ).

Nous nous intéresserons par la suite à la vision photopique car elle représente celle qui rentre en compte dans nos scénarii d'éclairage. Dans ces conditions l'œil humain a une réponse différente en fonction des longueurs d'ondes. La CIE a défini la sensibilité d'un observateur : on parle de la courbe  $V(\lambda)$  ou courbe photopique.

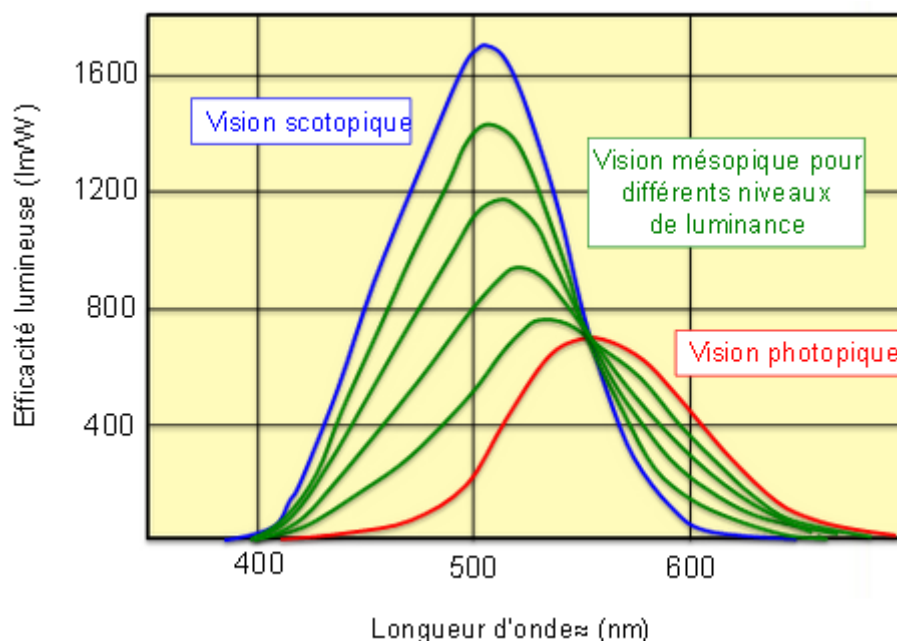


Figure 18 De la vision scotopique à la vision photopique

## La vision des couleurs

La perception de la couleur par l'œil humain ne peut être classée dans des phénomènes rigoureusement précis. La vision humaine a ses lois qui peuvent varier d'une personne à une autre selon ses sensibilités spectrales propres. Il arrive fréquemment que des déductions logiques tirées des caractéristiques des couleurs physiques ne s'appliquent pas à la vision de la couleur. Les lois de la physique jouent naturellement un rôle dans cette perception. Mais elles ne font qu'offrir un point de départ à un processus qui est contrôlé par la physiologie de l'œil, par la psychologie de l'homme et par une partie du cerveau : le cortex visuel.

Des réponses subjectives (la description par l'homme de ce qu'il ressent par l'intermédiaire de ses sens) posent inévitablement un problème pour la science. Les ondes lumineuses, par exemple, peuvent être décrites avec précision par la mesure de leur longueur d'onde et de leur amplitude, séparément ou en combinaison. Cependant, pour décrire ce qu'il voit, l'homme a recours à trois mots peu précis : teinte, clarté et saturation.

Le mot teinte est utilisé pour donner un nom au rouge, au vert, au bleu ou au jaune. Il est par conséquent en relation avec leur longueur d'onde. Le degré de clarté est un moyen pratique d'exprimer qu'une couleur est éclatante ou terne et il exprime une description de l'intensité apparente. Le jaune par exemple semble une couleur lumineuse mais non le bleu. La saturation relate la pureté d'une couleur c'est-à-dire le non-mélange de blanc qui semble y participer : le bleu profond semble saturé alors que le rose ne l'est pas. Heureusement, il y a une correspondance assez proche entre la couleur et la longueur d'onde, entre la brillance et l'intensité et entre la saturation et la pureté de la longueur d'onde de la lumière.

Ces relations sont naturellement les bases de la couleur telle qu'on la voit mais elles ne sont ni évidentes, ni directes. Chacune des trois caractéristiques de la perception peut être changée en modifiant une ou plusieurs des trois mesures physiques qui la caractérisent et non simplement celle qui lui est principalement liée. La couleur, par exemple peut être modifiée non seulement en changeant la longueur d'onde, mais aussi en altérant le degré de saturation ou, dans la plupart des cas, en augmentant ou en diminuant l'intensité de la lumière.

La façon la plus simple de changer la clarté est de modifier l'intensité physique de la source lumineuse. Mais on peut aussi la changer en modifiant la longueur d'onde ou le degré de saturation. De même, la saturation peut être modifiée non seulement en changeant le mélange des ondes mais aussi en accroissant l'intensité ou en changeant la couleur. Ces réponses

subjectives ne font pas partie du domaine de la physique mais de la physiologie ou de l'optogénétique.

La physiologie du système visuel est comprise dans les grandes lignes. Mais ce n'est que récemment que l'on a essayé d'identifier les substances des cônes qui sont particulièrement sensibles à l'une ou à l'autre des couleurs primaires, le rouge, le vert et le bleu. Néanmoins, il reste encore des problèmes à résoudre pour suivre le message transmetteur de couleur envoyé par les cellules photo-réceptrices à travers les cellules nerveuses de la rétine puis tout le long du nerf optique en direction du corps genouillé latéral, de la zone visuelle du cortex et du reste du cerveau.

La constance de la couleur est l'un des phénomènes les moins bien compris de la vision chromatique : l'homme a tendance à voir les choses familières avec une couleur identique dans des conditions d'éclairage variées.

L'homme voit des objets familiers sous bien des sortes de lumière et finit par apprendre à les voir « correctement » c'est-à-dire en les rapportant à la lumière blanche et dans n'importe quelles circonstances. Cependant cette généralisation de la couleur mémorisée, comme bien d'autres aspects plus complexes de la perception chromatique, doit être interprétée avec prudence car la constance de la couleur n'est pas une réaction prévisible en toute occasion.

Un autre aspect important de cette constance est en relation avec les indices. Ces indices comprennent la nature physique de l'objet et sa relation avec d'autres, mais aussi les caractéristiques de l'éclairage, des ombres, des contrastes de couleurs qui entourent l'objet.

Sans savoir exactement comment les signaux chromatiques de l'œil atteignent le cerveau, les recherches sur la perception des couleurs ont fourni une grande quantité d'informations sur la façon dont nous réagissons aux couleurs.

Le problème fondamental est que la vision des couleurs comprend d'une part, un processus physiologique, par lequel l'énergie lumineuse est transformée pour le cerveau en signaux chromatiques et d'autre part, un processus psychologique par lequel le cerveau interprète ces signaux.

Un des premiers théoriciens, Thomas Young peut offrir une explication satisfaisante de la vision des couleurs comme une action purement psychologique dans laquelle les combinaisons de trois couleurs primaires sont suffisantes pour créer toutes les teintes.



Plus tard, Ewald Hering propose une théorie plus complexe mais également plausible de vision en quatre couleurs, fondée sur les réactions humaines aux couleurs. Pendant des années les théories de Young et de Hering ont semblé être contradictoires. Ces deux théories ont divisé le monde scientifique mais l'avenir nous dira si ces dernières ne peuvent être simultanément correctes comme le sont les théories corpusculaire et ondulatoire de la lumière.

### Les nouveaux arguments

Les recherches récentes réalisées avec des techniques et des équipements plus performants semblent prouver la validité des deux points de vue.

Grâce à la mise au point d'instruments pouvant mesurer l'activité des cellules nerveuses isolées, un certain nombre de découvertes importantes ont été réalisées. Un micro-spectrophotomètre permet de mesurer la lumière transmise par un seul cône pour chaque longueur d'onde. Trois sortes de pigments sensibles à la lumière ont été identifiées dans les cellules réceptrices, l'un étant surtout sensible à la bande bleue, un autre à la verte et le troisième à la bande rouge. Les cônes peuvent être soumis à des essais divers. Le physicien américain Edward Mac Nichol Jr, envoie des rayons lumineux provenant de différentes parties du spectre sur des cônes et analyse l'énergie transmise par eux dans un ordinateur. Les renseignements semblent confirmer au moins un des aspects de la théorie Young Helmholtz : il y a trois types de cônes, chacun d'eux est spécialement sensible à une portion distincte du spectre. Cependant, il semble n'y avoir aucune preuve que les cônes envoient des signaux colorés directement au cerveau. Mac Nichol pense que la vision en couleur pourrait être un phénomène à deux étapes au moins, les signaux venant des cônes étant soumis à un mécanisme de codage comme celui que Hering attribue aux fibres nerveuses.

Des recherches complémentaires devront être réalisées avant que le parcours des signaux vers le cerveau puisse être détecté et les réponses mesurées.

L'aspect psycho physiologique de la vision chromatique, c'est-à-dire les effets d'une excitation physique sur un phénomène mental, ont aussi fourni des informations intéressantes sur l'absence de couleur. Dans l'obscurité totale, l'œil voit du gris foncé qui est assimilé à du noir dans notre langage courant.

## Les espaces colorimétriques de la CIE

Les premières expériences pour mesurer la vision des couleurs datent du début du XXème siècle. La CIE [XXIV] a défini trois couleurs primaires à partir de la moyenne de tous les observateurs ayant participé à ces expériences [LXIV]. Un premier modèle colorimétrique a été conçu avec composantes primaires XYZ (Figure 19 ).

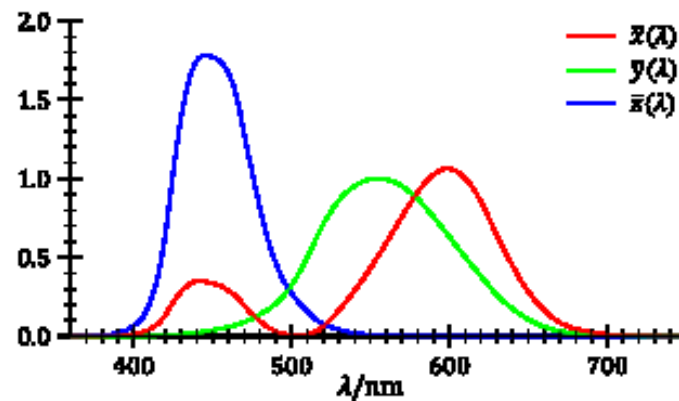


Figure 19 Réponse  $\bar{X}$   $\bar{Y}$   $\bar{Z}$

## Espace colorimétrique 3D xyz et 2D x,y

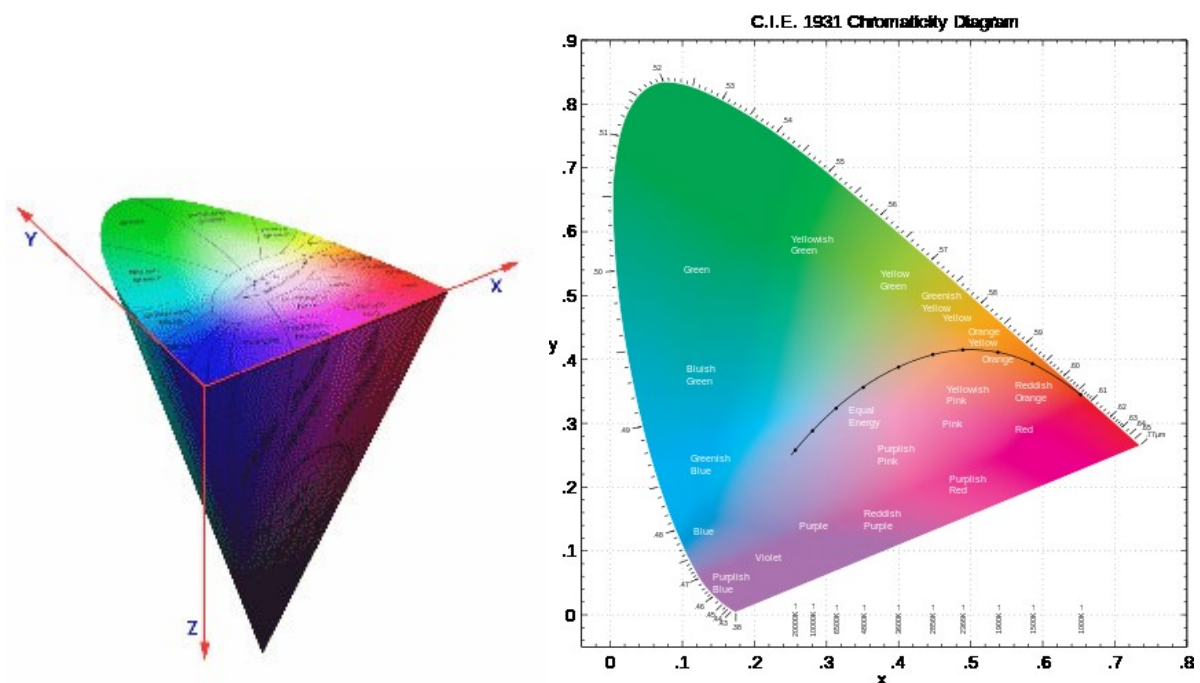


Figure 20 Espace xyz en 3D et en version 2D (xy)

Un premier espace chromatique (X, Y, Z) est défini par la CIE en 1931. Il permet la représentation des couleurs dans un espace 3D et correspond à l'observateur moyen. L'axe Y est relatif à la sensation de l'intensité lumineuse, ainsi une représentation en coordonnées réduites (x, y) a été définie (Figure 20 ).

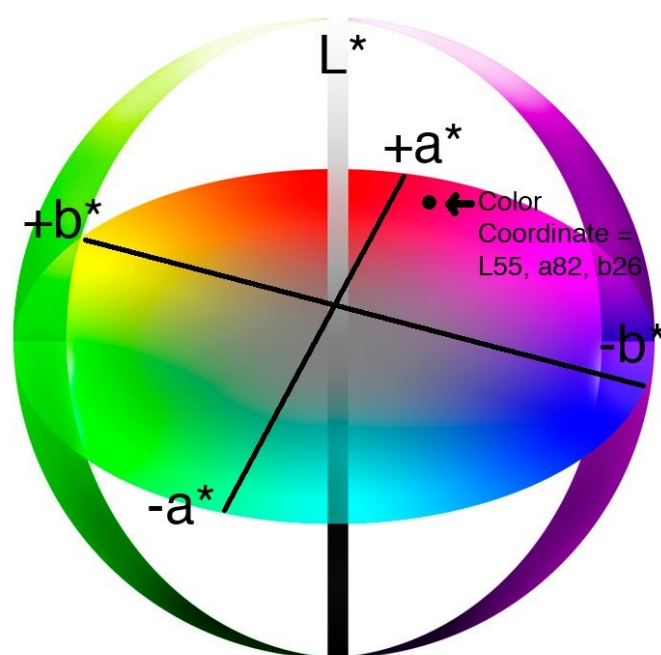
Les formules de passage entre les composantes x, y, z et XYZ sont les suivantes :

$$\begin{cases} X \\ Y \\ Z \end{cases} \rightarrow \begin{cases} x = \frac{X}{X+Y+Z} \\ y = \frac{Y}{X+Y+Z} \\ z = \frac{Z}{X+Y+Z} \end{cases} \text{Équation 9}$$

Cet espace (x, y, z) est critiqué notamment sur la représentation des couleurs non uniformes en terme de perception. Pour remédier à cela, la CIE a publié d'autres espaces tels que l'espace (u, v) ou (u' v'), surtout utilisé par l'industrie, ou l'espace Lab présenté dans la section suivante.

### Espace colorimétrique Lab

L'espace colorimétrique Lab (Figure 21 ), ou plus précisément le L\*a\*b\*, est un modèle de représentation des couleurs défini par la CIE en 1976. Il reprend le modèle de Hunter créé en 1948. Il est conçu pour que les distances euclidiennes calculées entre les couleurs dans cet espace correspondent aux différences perçues par l'être humain.



Il est constitué par trois axes L, a et b:

-L est la composante en clarté variant de 0 à 100

-a est la composante sur l'axe vert-rouge variant de -300 à +299

-b est la composante sur l'axe bleu-jaune variant de -300 à +299.

L'axe central, a=b=0, correspond au blanc de référence plus ou moins intense (blanc L= 100 <gris< noir L = 0). Plus on s'écarte de cet axe, plus la chromaticité (quantité de couleur perçue) est importante et pour une même luminance, plus la saturation est importante.

Ci-dessous les formules pour obtenir les coordonnées Lab à partir des coordonnées XYZ :

$$L^* = 116 f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - 16 \quad \text{Équation 10}$$

$$a^* = 500 \left[ f\left(\frac{X}{X_n}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) \right] \quad \text{Équation 11}$$

Avec  $X_n, Y_n, Z_n$ , les coordonnées (X, Y, Z) du blanc de référence.

$$b^* = 200 \left[ f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_n}\right) \right] \quad \text{Équation 12}$$

$$\text{et } f(t) = \begin{cases} t^{1/3} & \text{si } t > \left(\frac{6}{29}\right)^3 \\ \frac{1}{3} \left(\frac{29}{6}\right)^2 t + \frac{4}{29} & \text{sinon} \end{cases} \quad \text{Équation 13}$$

## Adaptation de l'œil.

### Les modèles d'apparence couleurs

Le système visuel humain perçoit la couleur d'un objet différemment selon les conditions d'éclairage et l'environnement.

Le modèle d'apparence des couleurs (CAM) permet de modéliser ou reproduire des images de manière optimale, indépendamment de la configuration de l'éclairage ou du support. Aussi les champs d'application sont nombreux : photographie, télévision, cinéma, arts graphiques. Il existe plusieurs CAM comme RLAB; ZLAB, LLAB, Von Kries, Nayatani, etc. Certains sont normalisés par la CIE comme le CIECAM97s et le CIECAM02.

Les modèles d'apparence des couleurs sont utilisés pour étendre la colorimétrie traditionnelle (par exemple, CIE XYZ et CIELAB) à la prédiction de l'apparence de stimuli colorés sous une grande variété de conditions d'observation. On prend en compte les valeurs trichromatiques du stimulus, du fond lumineux, de l'environnement, le niveau de luminance et d'autres facteurs tels que la réduction cognitive des effets de l'illuminant. Les attributs de la perception sont transformés pour s'adapter au système visuel humain.

# Propriétés physiques et caractéristiques techniques des éclairages

Après avoir traité de la vision humaine et de la photométrie, nous allons aborder les différentes sources de lumière. Celles-ci ont évolué historiquement : après celles issues de la combustion (feu, bougie) l'apparition de l'électricité apporte des possibilités nouvelles. Les techniques s'améliorent, se diversifient tout en introduisant des propriétés physiques multiples et en constante évolution. Il nous paraît intéressant de présenter les grandes familles d'éclairage moderne et les possibilités qu'elles apportent jusqu'à la révolution des DEL.

## La lampe à filament : du tungstène à l'halogène

Historique :

- 1835 : James Bowman Lindsay présente un prototype de lampe électrique : l'ampoule est posée sur le culot et offre une puissance lumineuse adaptée à la lecture. Il ne protège pas son invention et ne développe pas la technologie au-delà du prototype.
- 1875 : Henri Woodward et Mathew Evans déposent un brevet décrivant la première lampe à incandescence à base de filament de carbone.
- Vers 1879, Thomas Edison achète le brevet de Woodward et Evans et perfectionne les performances du procédé.

Un bon nombre d'améliorations de ce principe viennent ensuite : utilisation de matériaux différents pour le filament (Tungstène), vide d'air un peu plus poussé dans le bulbe de verre, addition de gaz supplémentaire dans le bulbe.

Apparaissent alors les lampes à incandescence de type *halogène*. L'emploi d'un gaz halogène permet de porter à plus haute température le filament tout en permettant une meilleure recombinaison du filament avec le gaz halogène. Il apporte donc une meilleure efficacité lumineuse. La température de couleur de ces technologies est généralement comprise entre 2500K et 3000K.

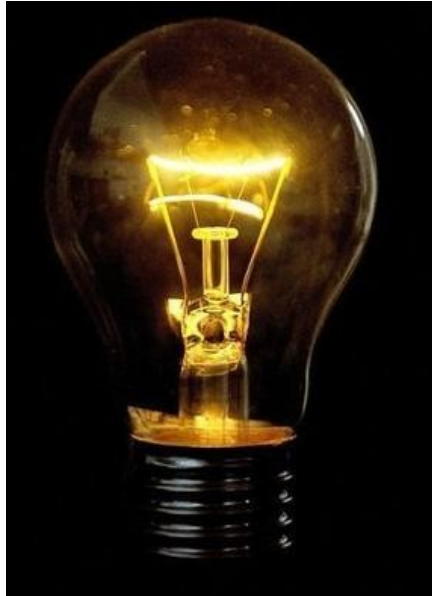


Figure 22 Lampes à filament

### Principe :

Les techniques sur les différentes parties qui constituent les lampes à incandescence (filament, support de filament, type de verre, gaz interne) ont évolué mais nous retrouvons la même conception à savoir un filament de tungstène tenu par un support et alimenté par des conducteurs rigides, le tout dans un bulbe de verre vidé de son air ou dans lequel un gaz est introduit (Figure 22 ). Un culot solidarise le tout. Selon leur nature, les filaments sont utilisés à des tensions différentes et le courant qui les traverse les chauffe jusqu'à les rendre « rouge incandescent ». Ils émettent alors une lumière proche de celle qu'émettrait un corps noir chauffé à la même température (souvent autour de 2500 à 3000K). Cette lumière possède un spectre continu. Elle est en grande partie constituée d'infrarouges, d'où la faible efficacité des lampes à incandescence dans le visible.

Ces dernières années ont vu apparaître de nouveaux types de lampes à incandescence grâce à l'amélioration de la capacité des filaments de supporter des courants plus élevés et grâce à l'usage de gaz internes différents. Ces lampes ont des spectres lumineux à plus de 3000K. Elles sont considérées d'un point de vue lumière comme plus froides mais correspondent à une température de fonctionnement plus élevée. Leur efficacité peut dépasser légèrement les 20 à 25lm/W. Une grande diversité de lampes de ce type existe sur le marché allant de minuscules lampes (quelques millimètres) à des lampes de grande dimension, leur puissance excédant 5000W.

Ci-dessous (Figure 23 ) le spectre relatif d'une source à filament.

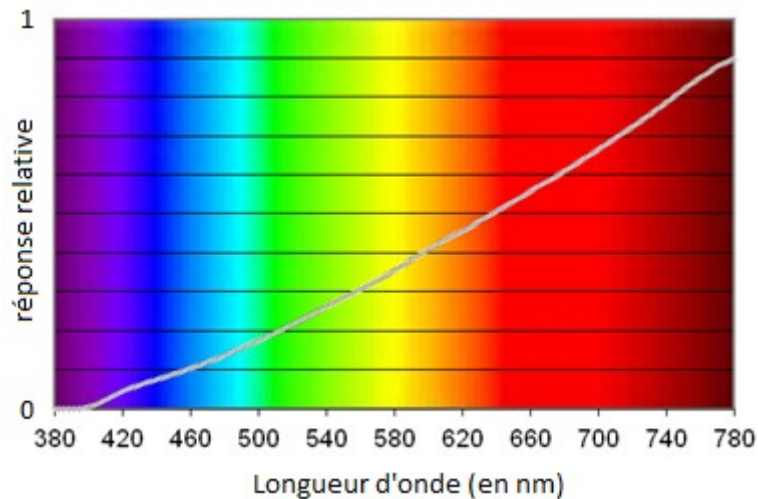


Figure 23 Exemple de la répartition spectrale d'une source Halogène

## Les lampes à décharge: les fluo et les lampes à haute pression

### Historique :

En 1705, Francis Hauksbee, le premier, décrit une lampe à décharge en montrant qu'un globe de verre dans lequel on réalise un vide partiel ou complet peut produire une lumière suffisante pour permettre de lire.

Vers 1840 Sir Georges Stokes étudie les solutions de sulfate de quinine. Il démontre que l'émission de lumière bleue qu'il appelle *réflexion dispersive* est consécutive à une absorption de lumière. Il propose le terme de fluorescence par analogie avec le mot opalescence.

Autour de 1890 Thomas Edison aidé de Nikola Tesla développe l'une des premières versions de lampe fluorescente.

Les lampes fluo-compactes telles que nous les connaissons apparaissent vers le milieu des années 1970, développées par Edward E. Hammer, ingénieur de développement à Général Electric.





Figure 24 Exemple de sources fluorescentes (FL et CFL)

### Principe :

Un gaz est excité à l'aide de deux électrodes. On peut ensuite différencier les sources fluorescentes des lampes à plasma.

Pour les sources fluorescentes, (Figure 24 ) cette excitation crée une lumière dans l'ultra violet. Des couches de poudres fluorescentes en transforment une partie dans le domaine visible. Les poudres de fluorescence réémettent des bandes spectrales généralement étroites. Mais certains tubes spéciaux ont cependant des parties de spectre relativement continues (Figure 25 ).

On peut découper les sources fluorescentes en deux parties : les tubes fluorescents, qui nécessitent l'utilisation de ballaste pour amorcer le tube, et les lampes fluo-compactes, qui sont des sources où la partie électronique des ballasts a été intégrée sur l'ampoule.

La qualité du rendu des couleurs des sources fluorescentes dépend du nombre et du type de phosphores utilisés. L'efficacité lumineuse est généralement comprise entre 80lm/W et 100lm/W pour les tubes. Elle est comprise entre 50lm/W et 80lm/W pour les fluo-compactes.

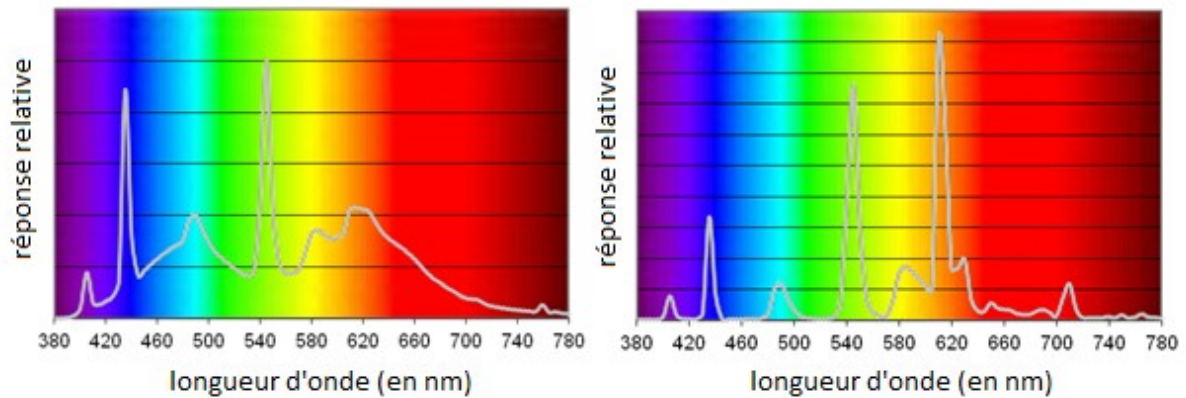


Figure 25 Exemple de spectres de sources fluorescentes



Figure 26 Lampes à décharge (gauche) source HMI (droite)

Pour les lampes à plasma (Figure 26 ), généralement hautes pressions, telles que les HID HQI et HMI, il se forme un plasma froid, c'est-à-dire un milieu où cohabitent, grâce à un apport d'énergie, des électrons et des ions à l'état libre. Sous l'effet des chocs, les atomes sont portés dans un état excité et leur retour à l'état fondamental s'accompagne d'émission de photons.

Les HID HQI et HMI sont des lampes à décharge qui présentent des spectres composés de raies dépendantes des éléments présents. Elles offrent généralement un rendement lumineux plus important que les sources à filaments, mais elles ont un moins bon rendu des couleurs. Elles sont principalement utilisées pour l'éclairage de lieux publics (voirie, stade) et elles sont peu utilisées à l'intérieur des habitations.

## Diodes Electroluminescentes

L'acronyme DEL désigne les diodes électroluminescentes ou LED (pour Light Emitting Diode).



Figure 27 Exemples de sources à DEL

### Historique :

- 1907: H. J. Round découvre la première émission de lumière par un semi-conducteur.
- 1927: O. V. Losev dépose le premier brevet de ce qui sera appelé, bien plus tard, une diode électroluminescente.
- 1962: Nick Holonyak, consultant chez General Electric invente la première DEL à spectre visible utilisable.

Dans les années 1990, les recherches de ShujiNakamura, de TakashiMukai, de Nichia, dans la technologie des semi-conducteurs InGaN permettent la création de DEL blanches en grande quantité et avec un rendement lumineux s'améliorant d'année en année.

### Le principe:

Lorsqu'on applique une tension à une jonction  $p-n$  (juxtaposition d'un semi-conducteur dopé  $n$  et d'un semi-conducteur dopé  $p$ ), des électrons sont injectés dans le semi-conducteur dopé  $p$  et des trous dans celui dopé  $n$  (Figure 28 ). On provoque ainsi un grand nombre de recombinaisons électron-trou, accompagnées d'émission de photons. Les diodes électroluminescentes à base de nitrure de Gallium (GaN) émettent dans le bleu. En dopant ce semi-conducteur avec de l'indium (InGaN), l'émission s'étend vers la région verte du spectre. Pour obtenir la lumière blanche, il suffit d'utiliser cette lumière pour exciter un dépôt de

luminophore (YAG : Ce) qui émet dans un large domaine de longueur d'onde centré vers 550nm (jaune-vert). Ainsi la superposition des lumières émises par InGaN et le luminophore donne une impression de lumière blanche

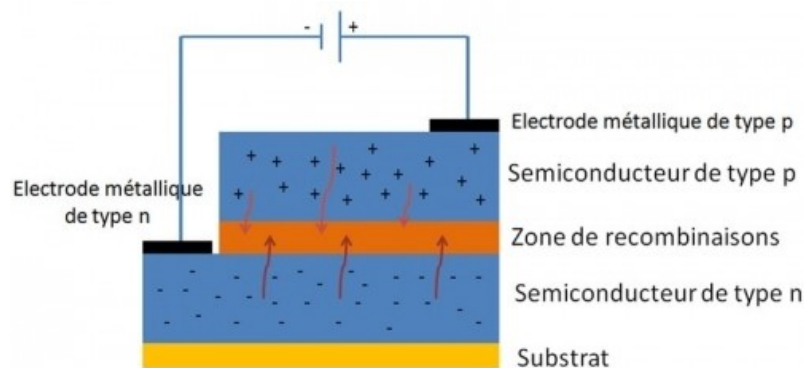


Figure 28 Principe de fonctionnement des couches de jonction d'une DEL

Les DEL sont de plus en plus utilisées pour l'éclairage. Leur grand avantage est la durée de fonctionnement souvent annoncée comme étant supérieure à 50 000 heures. Les standards de taille sont multiples (Figure 27 ) et ne se cantonnent plus aux DEL historiques de 3 ou 5 mm (format souvent utilisé pour les témoins lumineux). Même si les sources à DEL sont généralement constituées de plusieurs puces de quelques millimètres de côté (typiquement 4 x 4mm) il existe aussi des puces de réseaux de DEL avoisinant les 5 cm de côté. Le semi-conducteur est souvent encapsulé dans un boîtier en résine transparente dont la surface peut être bombée pour guider les rayons optiques dans une direction donnée. Les DEL blanches à base de GaN fonctionnent avec une tension d'alimentation proche de 3,6 V et un courant dépendant de la puissance de la DEL. L'efficacité lumineuse qui était d'une 50lm/W il y a 20 ans, a doublé tous les 10 ans. De nos jours certains fabricants arrivent à atteindre des valeurs dépassant les 300lm/W en laboratoire.

Les performances des DEL ont évolué (Figure 29 ) et ces dernières sont devenues « multi-technologies ». Les boîtiers constitués de différents matériaux, construits selon diverses méthodes, sont devenus plus complexes. Les connexions électriques font appel à des moyens de soudure particuliers (*ballbonding* pour les DEL à structures verticales et microbilles pour les DEL de type *flip ship*). Selon le matériau conducteur utilisé et selon le dopage choisi, les propriétés optiques du semi-conducteur sont différentes. Le seuil d'énergie entre la bande de valence et la bande de conduction va influencer sur l'énergie des photons émis et par conséquent sur la longueur d'onde de la lumière émise.

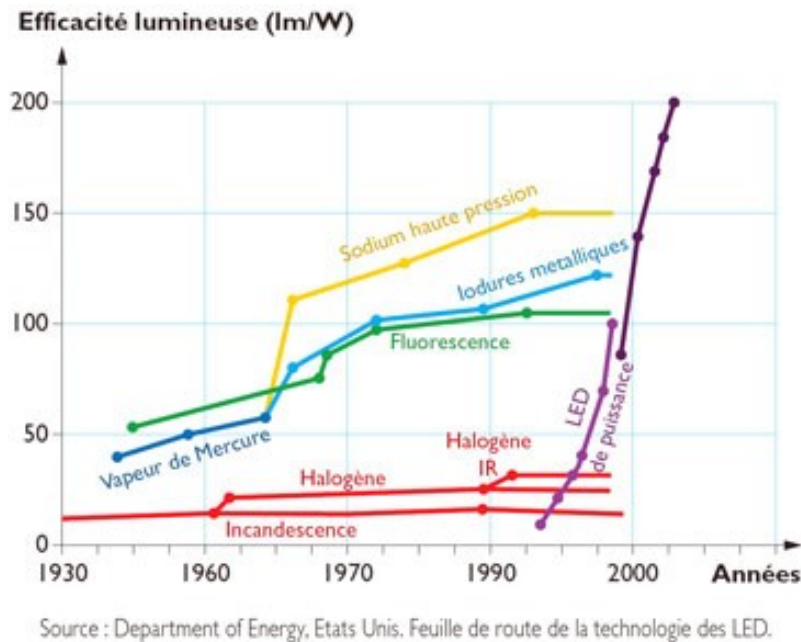


Figure 29 Evolution des efficacités lumineuses des technologies traditionnelles et DEL

Dans les technologies utilisées pour l'éclairage, on retrouve deux grandes familles de technologie à DEL : soit un ensemble de DEL est associé pour couvrir le domaine spectral du visible, soit une partie de la lumière émise par la DEL est transformée à l'aide d'un luminophore. Cette dernière famille peut se diviser en deux sous familles : les DEL avec une excitation dans le visible (généralement dans le bleu) et celles avec une excitation dans le proche ultraviolet. Ces DEL sont recouvertes par un ou plusieurs types de phosphores. Nous allons présenter plus en détail chacune de ces trois technologies :

## Association de DEL (ou Cluster de DEL)

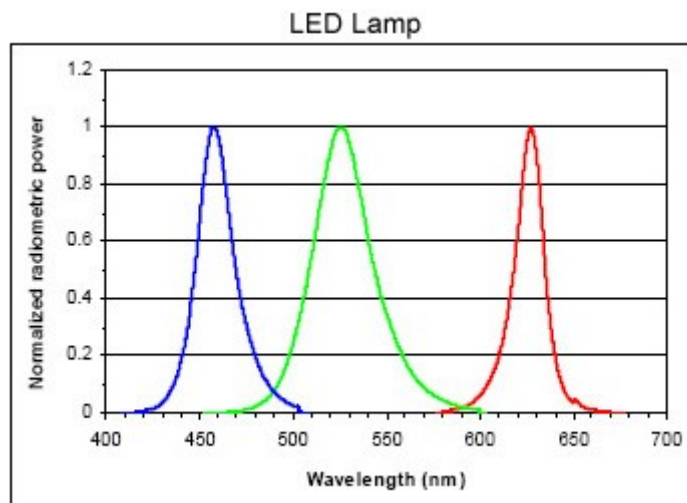


Figure 30 Répartition spectrale d'un Cluster associant 3 DEL (bleu - vert - rouge)

Cette technologie utilise l'association de généralement trois ou quatre DEL de couleur. Par exemple, un cluster RGB (Figure 30 ) se compose de trois DEL Rouge, Vert et Bleu. Les DEL ont généralement une largeur à mi-hauteur comprise entre 20 et 40nm. Par conséquent, le spectre émis par ces solutions varie en fonction du nombre de DEL différentes utilisées. Ainsi, une solution n'utilisant que trois DEL aura des pics relativement étroits ne permettant pas toujours la restitution de certaines couleurs. Les objets de couleurs proches des pics d'émission, ressortiront, eux, d'avantage.

## DEL excitation bleu + phosphore jaune :

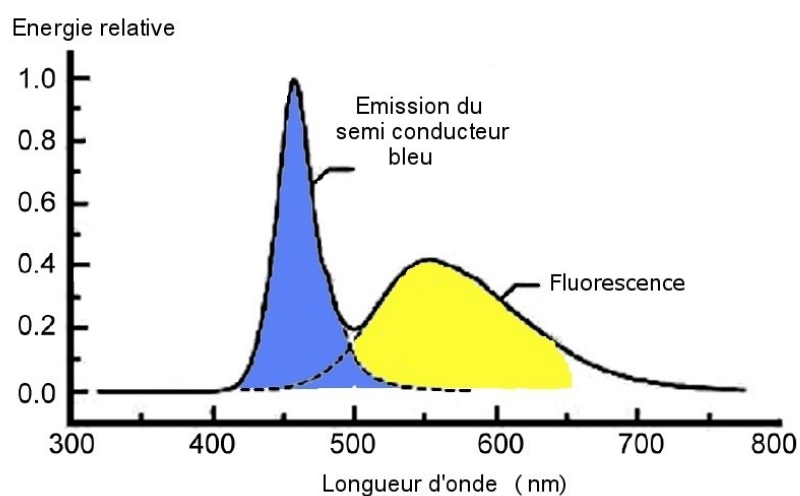


Figure 31 Répartition spectrale d'une DEL avec excitation dans le bleu + phosphore



Une DEL émettant dans le bleu (centré vers  $\sim 450\text{nm}$  et de largeur  $\sim 20\text{ nm}$ ) est recouverte d'un type (parfois deux) de phosphore jaune qui absorbe plus ou moins de lumière bleue et la retransmet dans le jaune (centré entre  $540$  et  $620\text{nm}$  et de largeur  $\sim 160\text{ nm}$ ) (Figure 31 ). En fonction de l'épaisseur de la couche de phosphore, la température de couleur peut varier de  $2500\text{K}$  à plus de  $7500\text{K}$ . Certaines de ces solutions se voient complétées avec une DEL rouge ( $\sim 630\text{nm}$ ) afin d'abaisser la température de couleur sans mettre une couche de phosphore trop importante et donc garder un bon rendement flux/consommation énergétique. Ceci permet aussi d'améliorer les teintes rouges.

## DEL NUV

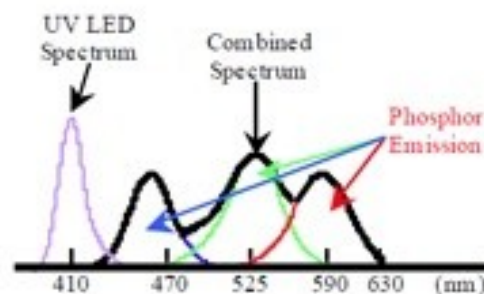


Figure 32 Répartition spectrale d'une DEL NUV

Sur le même principe que les DEL "bleu+ phosphore jaune", ces DEL ont une excitation proche des UV, avec un dépôt de plusieurs phosphores, souvent trois : un bleu, un vert et un rouge (Figure 32 ). La répartition de la puissance lumineuse est, en conséquence, mieux diffusée sur l'ensemble du domaine visible.

La variation de quantité de chaque couche de phosphore permet un ajustement précis des caractéristiques colorimétriques de ces DEL. La température de couleur peut varier de  $2500\text{K}$  à plus de  $7500\text{K}$ .

## Deuxième partie

# Caractérisations physiques et qualité des éclairages

L'homme a toujours eu besoin d'effectuer des mesures et de quantifier les éléments qui l'entourent, ne serait-ce que pour conclure les accords d'un échange ou parler le même langage.

Cette partie a pour but de faire le lien entre les grandeurs physiques établies au cours des découvertes décrites dans le chapitre précédent, leurs mesures qui sont des éléments universels et reproductibles et les moyens mis en place pour étudier des phénomènes plus subjectifs. Ces derniers sont définis par des indices de qualité et des métriques. Il importe donc de connaître précisément les critères pertinents qui permettent de caractériser un environnement lumineux en faisant le lien entre ces données afin de mettre au point des outils capables de juger de la qualité des éclairages.

Dans un premier temps nous avons répertorié un certain nombre de grandeurs physiques ainsi que les instruments associés à l'évaluation de ces grandeurs. Ensuite, nous avons rassemblé l'état de l'art existant dans le domaine du rendu des couleurs qui permettra de définir les indices les plus performants pour la suite de notre étude. Enfin, nous avons sélectionné les critères qui paraissaient compatibles avec la problématique du confort visuel.



# Caractérisations des éclairages

Nous avons présenté dans le premier chapitre les grandeurs radiométriques impliquées ainsi que les différentes technologies d'éclairage. Nous allons décrire comment nous pouvons mesurer ces grandeurs radiométriques pour caractériser des éclairages à l'aide d'instruments existants. Une présentation plus détaillée est faite pour des moyens de mesures plus spécifiques développés pour notre étude.

## Les moyens de caractérisations physiques et leurs étalonnages

Après un rappel des définitions des différentes grandeurs radiométriques, nous présentons les moyens que nous avons utilisés au sein du LNE ainsi que leurs étalonnages. Leurs rattachements à la métrologie des rayonnements optiques en France sont présentés en annexe 2.

### Le goniomètre



Figure 33

Goniomètre à miroir tournant du LNE

Un goniomètre (Figure 33 ) est un dispositif mécanique doté d'un détecteur qui permet de mesurer l'intensité émise par une source dans une direction donnée et ce, dans différentes directions de l'espace. Cette direction est repérée par deux angles. La mesure consiste à balayer l'ensemble des directions d'émission d'une source de lumière en faisant varier ces deux angles puis à calculer le flux en faisant une intégration sur l'espace matérialisé par les différentes directions de mesure.

La qualité d'une mesure de flux au goniomètre dépend de plusieurs paramètres :

- Le pas angulaire adopté devra être suffisant pour distinguer les variations brutales d'intensité dans certaines zones angulaires. Cet aspect concerne surtout les luminaires directs.
- La distance de mesure doit être grande pour pouvoir appliquer la loi de Bouguer.
- La source doit rester immobile car la position de la lampe conditionne la circulation des courants de convections internes ou externes. La température interne ou externe de la source peut ainsi être modifiée, ce qui, pour certaines sources, a un impact significatif sur le rayonnement.
- Le détecteur ne doit recevoir que l'intensité directe issue de la source. Toute réflexion contre les murs d'une pièce, par exemple, doit être évitée.

Bien réalisées, les mesures goniométriques sont fiables mais présentent quelques inconvénients :

- Elles sont longues à réaliser : un hémisphère couvert avec un pas angulaire de  $5^\circ$  correspond à 1297 directions pour chacune desquelles il faut effectuer une mesure d'intensité.
- Elles nécessitent l'utilisation de systèmes mécaniques précis et de grandes dimensions.
- Elles doivent être réalisées dans une pièce de grande étendue.

Les mesures goniométriques nécessitent donc un investissement important et des infrastructures adaptées.

## La sphère intégratrice

Une sphère d'intégration (Figure 34 ), ou une sphère d'Ulbricht, est une cavité creuse dont l'intérieur a été recouvert d'une peinture lambertienne dont le coefficient de réflexion est le plus proche possible de 100% [annexe 6] et en général supérieur à 80%.

Le principe de la sphère est que le flux provenant d'une source interne ou externe à la sphère se répartit uniformément sur toute sa surface grâce aux réflexions multiples sur les parois car chaque point de la sphère éclaire uniformément le reste de la sphère.

Pour une source interne à la sphère l'éclairement de la surface de la sphère est donc proportionnel au flux total émis dans toutes les directions.

Certaines sphères permettent de placer une source directement à l'intérieur, soit au centre, soit en périphérie.

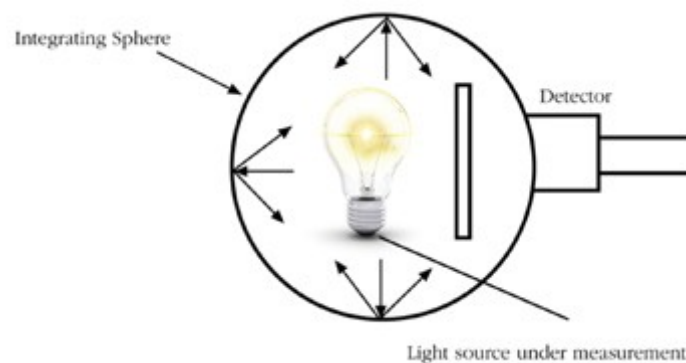


Figure 34 Exemple des principes d'utilisation d'une sphère d'intégration

La propriété essentielle de la sphère d'intégration repose sur le fait qu'une seule mesure d'éclairement indirect permet d'obtenir une valeur proportionnelle au flux de la source de rayonnement. Le coefficient de proportionnalité est obtenu par étalonnage à l'aide d'une lampe étalon de flux. La sphère d'intégration permet donc la mesure du flux énergétique ou lumineux.

Par rapport au goniomètre, l'intérêt est de déterminer le flux avec une seule mesure d'éclairement ce qui est plus rapide. Cependant la mesure en sphère intégrante n'est pas d'une grande précision si la source est de grande dimension par rapport à la taille de la sphère. D'autre part, l'auto-absorption, liée au revêtement interne de la sphère à l'encombrement de la source doit être pris en compte pour l'étalonnage.

## Luxmètre

De manière générale, un appareil de mesure d'éclairement est appelé radiomètre s'il sert à mesurer l'éclairement énergétique. Le luxmètre, qui mesure uniquement un éclairement visuel, est constitué d'une cellule contenant une photodiode, reliée à un boîtier contenant le système électronique de conversion des charges en valeur d'éclairement présentée sur un affichage.

Comme nous l'avons indiqué plus haut, l'éclairement sur une surface varie comme le cosinus de l'angle entre sa normale et la direction de la source. Les photodiodes en silicium ont une réponse en angle qui ne suit pas nécessairement une loi cosinus. Pour qu'elles répondent conformément à l'éclairement à mesurer, on les couvre donc d'un diffuseur qui a une absorption angulaire lambertienne et permet de reproduire la variation de l'angle. Ce diffuseur est appelé 'correcteur cosinus'.

Concernant les luxmètres, mentionnons que les photodiodes n'ont pas la même sensibilité que l'œil humain selon les longueurs d'onde. Une mesure correcte d'une grandeur photométrique nécessite la correction de cette sensibilité afin qu'elle s'approche au plus près de la fonction  $V(\lambda)$ . Cette amélioration est réalisée par un ensemble de filtres placés devant la photodiode.

Un luxmètre est donc un système simple dans sa constitution et sa qualité. Par contre, il est conditionné par le soin apporté dans la conception de son correcteur de cosinus et dans celle des filtres de correction de la sensibilité spectrale.

## Luminancemètre

Comme son nom l'indique, le luminancemètre permet de mesurer une luminance. le luminancemètre est constitué d'une photodiode munie d'une optique qui permet de recueillir la partie du faisceau issue de la surface d'une source dans un cône d'émission donné tel que sur la figure ci-dessous et de le concentrer sur la photodiode. Il permet :

- De pointer une surface délimitée d'une scène dont on cherche à connaître la luminance,
- De définir une direction de mesure

Le détecteur du luminancemètre est filtré de la même façon que celui du luxmètre décrit ci dessus. Pour cette thèse j'ai utilisé l'OL1000 de LMT.

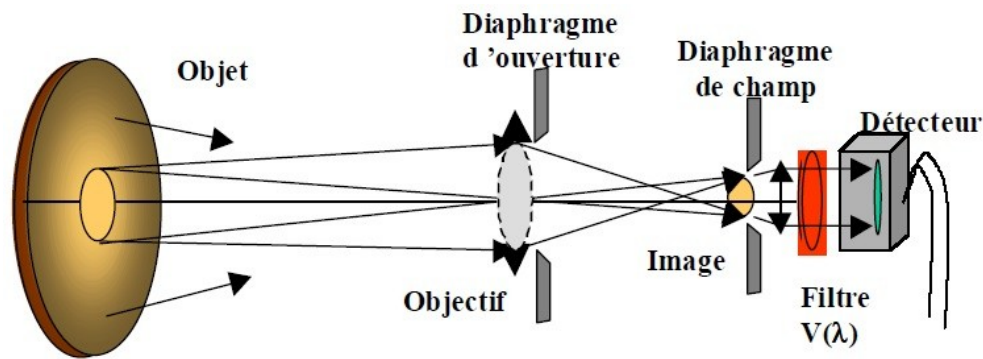


Figure 35 Schéma montrant une mesure par luminancemètre

## Spectroradiomètre

Un Spectroradiomètre (Figure 36 Figure 37 ) est un appareil permettant la mesure du flux de rayonnement électromagnétique en fonction de la longueur d'onde. Il peut travailler dans l'ultraviolet, le visible et l'infrarouge. Pour les sources à bande étroite tels que les DEL, les lampes à décharge, les CFL et les écrans LCD, une mesure spectrale donne un résultat bien plus détaillé qu'un simple photomètre ou colorimètre.

Pour décomposer le spectre lumineux en longueur d'onde, il existe deux familles de Spectroradiomètres : ceux à prisme et ceux à réseau (un ou deux réseaux en série en fonction de la résolution spectrale désirée).

Ensuite, le spectre atteint soit une matrice CCD qui permet l'acquisition de l'ensemble du spectre, soit une cellule photosensible mono élément ce qui nécessite le balayage séquentiel du spectre obtenu par rotation de l'élément dispersif, prisme ou réseau.

Au cours de cette thèse nous avons choisi d'élaborer notre dispositif de mesure des spectres lumineux à partir des deux Spectro-radiomètres suivant : le CDS 2100 de Labsphere et le CS1000 Konica Minolta. Ces appareils nous ont permis d'extraire des informations lumineuses précises pour la caractérisation physique des environnements. Le CDS2100 a été employé pour obtenir des informations représentatives de la lumière perçue au niveau de l'œil ; alors que le CS1000 a été utilisé pour caractériser des zones particulières de l'environnement. Ci-dessous une illustration du CDS2100 et du CS1000. L'un mesure l'éclairement, l'autre la luminance.



Figure 36 Le CDS2100 et une tête optique



Figure 37 Le CS1000

## L'étalonnage

Les instruments de mesure sont sensibles aux flux énergétiques qu'ils reçoivent. Ils convertissent un rayonnement reçu en signal électrique.

Il convient de mesurer la valeur du signal électrique obtenu par rapport à la grandeur à mesurer (flux, éclairement, luminance) issue d'une *source étalon*. C'est ce qu'on appelle l'étalonnage.

Les sources étalon sont généralement des sources de lumière à incandescence. On peut mentionner historiquement les lampes à ruban de tungstène comme étalon de luminance. Plus près de nous, Les lampes à filament de tungstène en flux et en intensité et les lampes quartz halogène comme étalon d'éclairement. Des DEL étalons sont actuellement en cours de développement.

## La mesure du spectre

Il s'agit ici de mesurer l'énergie présente pour chaque longueur d'onde. On obtient donc la répartition spectrale de la lumière mesurée. Le spectre lumineux peut être collecté à partir d'un environnement de façon globale, avec une tête cosinus par exemple, sans tenir compte d'un objet particulier. Il peut aussi être effectué sur une mesure des rayons venant d'une zone particulière lorsqu'un objectif est installé sur un spectro-radiomètre. Dans le cadre des mesures réalisées dans cette thèse, j'ai été amené à utiliser un CS1000 de Minolta et un CDS2000 de Labsphère. Ces deux appareils ont été étalonnés de façon périodique sur plusieurs aspects de la lumière : (1) au niveau des longueurs d'ondes, à l'aide de lampe à vapeur émettant des pics très fins, à des longueurs d'ondes connues. Cela permet de vérifier si les appareils sont bien calés par rapport au spectre. (2) Après avoir vérifié que l'appareil restitue des mesures aux bonnes longueurs d'ondes, j'ai procédé à un premier étalonnage à l'aide d'une source étalon et j'ai établi un premier coefficient d'étalonnage propre à chaque longueur d'onde. Ainsi le spectre relatif mesuré est corrigé pour correspondre au spectre relatif de la source étalon connu (3). Enfin un dernier étalonnage s'est avéré nécessaire concernant la quantité globale de lumière : à l'aide d'une autre source étalon j'ai comparé la quantité totale de lumière mesurée avec la quantité de lumière émise par la source étalon dans le plan de mesure de l'appareil.

## Les mesures des facteurs humains : Eyetracker

L'oculométrie (en anglais Eye-tracking ou Gaze-tracking) regroupe un ensemble de techniques permettant d'enregistrer les mouvements oculaires (Figure 38 ). Les oculomètres les plus courants analysent des images de l'œil humain enregistrées par une caméra, travaillant souvent dans le milieu de l'infrarouge, pour calculer la direction du regard du sujet. En fonction de la précision souhaitée, différentes caractéristiques de l'œil sont analysées. D'autres techniques sont basées sur les variations de potentiels électriques à la surface de la peau du visage ou encore sur les perturbations induites par une lentille spéciale sur un champ magnétique.



Figure 38 Les lunettes : eye-traker

Certains systèmes d'eye-tracking sont non intrusifs. Leur conception permet un usage simple, rapide et efficace. Leur facilité d'utilisation allège les protocoles de mesures. Leur précision et la confiance dans les données qu'ils délivrent les rendent adéquats pour des utilisations en recherche.



# Développement des outils de caractérisation

## Goniocam

Les différents appareils décrits précédemment ne permettent pas la mesure des distributions spatiales lumineuses et colorimétriques de l'environnement visuel. Pour pallier à ce manque, nous avons réalisé et étalonné un nouvel outil. Il est constitué d'une caméra photométrique montée sur un goniomètre à deux axes de rotation que l'on a dénommé Goniocam.

### La réalisation

Pour numériser un environnement lumineux, nous avons monté une caméra photométrique sur les deux axes goniométriques (Figure 40 ). Le goniomètre permet d'effectuer la rotation de la caméra autour de l'axe horizontal (angle « phi »  $\Phi$ ) et de l'axe vertical (angle « thêta »  $\Theta$ ). Cela permet de déplacer le champ de la caméra ( $\sim 15^\circ \times 15^\circ$ ) et de parcourir le champ visuel humain. Le point nodal de la caméra photométrique est positionné au centre de rotation du goniomètre.

Le point nodal (d'émergence  $N'$ ) a la particularité de conserver l'alignement des images formées sur le détecteur par des objets situés à des profondeurs différentes. Ainsi le recoupement entre deux objets est conservé quand l'objectif effectue une rotation.

Connaissant les angles effectués par les platines, nous pouvons déduire l'angle d'un rayon venant éclairer une zone de la matrice CCD.

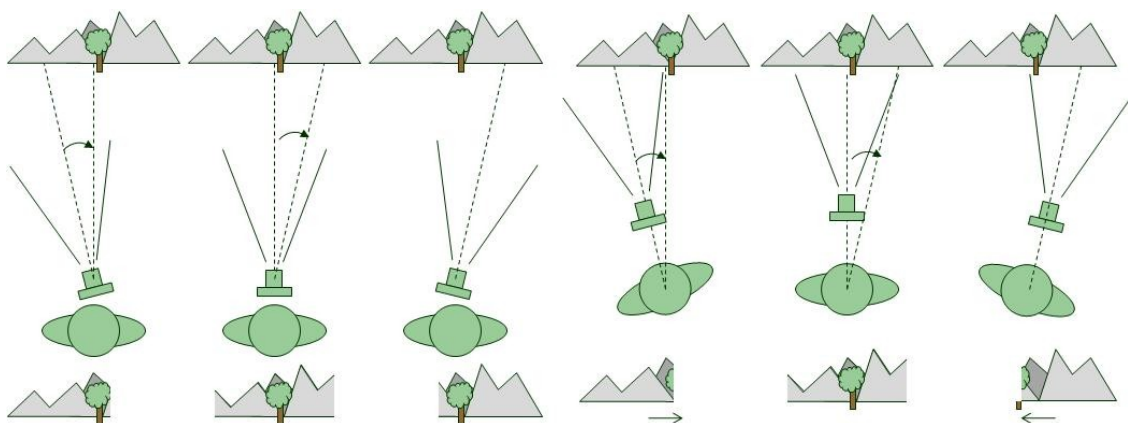


Figure 39

Gauche : rotation autour du point nodal ; droite : rotation derrière le point nodal

Ci-dessus (Figure 39 ), une illustration montre l'importance du point nodal pour la reconstruction de plusieurs prises de vue d'un environnement. A gauche, la rotation se fait au niveau du point nodal, la position de l'arbre varie sur l'image mais la montagne qui se trouve derrière reste dans le même alignement. A droite la rotation ne s'effectue plus au niveau du point nodal, l'alignement arbre-montagne n'est plus conservé.

La caméra permet d'obtenir une matrice de luminance.

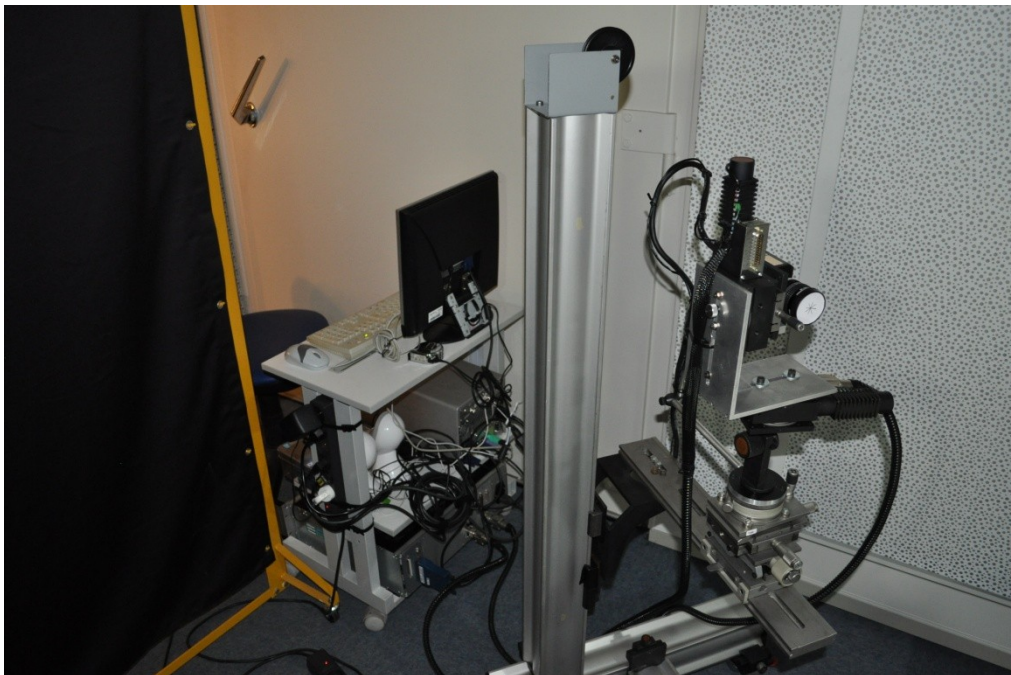


Figure 40 Le Goniocam

## L'acquisition des données

Afin d'obtenir les informations relatives à chaque numérisation, nous avons caractérisé la caméra photométrique pour plusieurs mises au point ainsi que l'ensemble objectif - CCD caméra photométrique. Cette partie sera traitée dans le chapitre sur l'étalonnage.

Il convient aussi de présenter les paramètres d'acquisition utilisés.

L'objectif de la caméra a un angle de champ moyen de  $15,5^\circ$ . Pour couvrir un champ visuel représentatif de la vision humaine de  $120^\circ$  verticalement et  $135^\circ$  horizontalement, il est nécessaire de faire l'acquisition d'un champ  $8 \times 9$  images. La caméra a une résolution de  $1024 \times 1024$  pixels codés sur 8 bit.

La dynamique qu'offre le capteur CCD de la caméra ne nous permet pas de couvrir les niveaux lumineux présents dans les scènes ainsi que la dynamique de l'œil humain. Pour remédier à ce problème, nous avons utilisé un jeu de quatre densités optiques allant de  $10^{-1}$  à  $10^{-4}$ . Il a fallu jouer également sur le paramètre du temps d'intégration de la caméra (paramétrable de 10ms à 150ms).

Pour finir, nous réalisons une prise de 9 x 8 images fois 3 densités fois 3 temps d'intégration soit 648 images pour numériser l'espace visuel. Cette réalisation prend une vingtaine de minutes compte tenu des déplacements de la caméra.

## Reconstruction de l'environnement

Chacune des images est initialement corrigée en fonction de ces paramètres d'acquisition : temps d'intégration, densités neutres et effets dus à l'objectif tel que le vignettage et la mise au point.

Ensuite, pour un temps d'intégration donné et une densité donnée, un programme informatique extrait des 648 images de la configuration les données numérisées dans une matrice 4096 x 4096 correspondant à l'environnement en  $\theta$   $\phi$  à  $\pm 80^\circ$ . Un ensemble de 14 paramètres permet de corriger les défauts mécaniques du système, tel que le désaxement des platines goniométriques, l'inclinaison du système optique, les offsets sur les axes. Nous obtenons donc neuf fichiers, correspondant à chaque niveau (3 Ti x 3 densités).

En annexe, se trouve l'interface du programme avec les paramètres pris en compte.

Ci-dessous (Figure 41 ) l'illustration d'une scène avec et sans ces corrections de reconstruction.

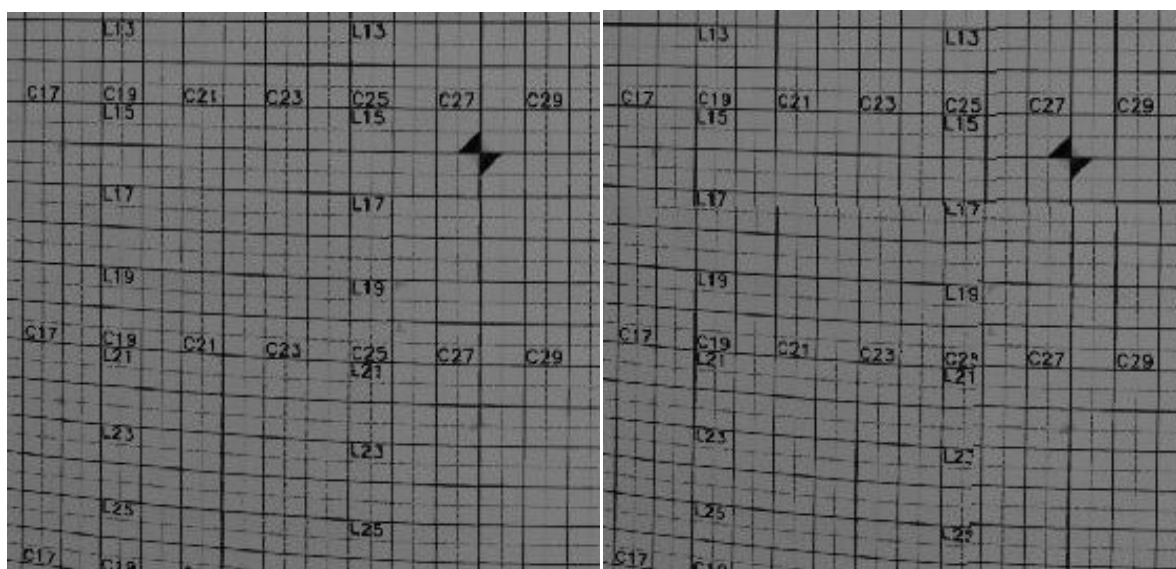


Figure 41            Gauche: une image recombinaison avec les coefficients correcteurs; droite :  
sans ces coefficients

A partir de ces fichiers, un second programme examine les données établies afin de ne pas conserver des données saturées ou sous exposées où le bruit serait trop présent. Enfin ce programme combine les différents niveaux de cartes de luminance évalués conformes en une seule carte de luminance.

Les calculs relatifs à l'éblouissement, distribution et niveau lumineux, sont réalisés sur l'ensemble de ces cartes de luminance. Les calculs prennent donc en compte la valeur physique de la luminance mesurée par le goniocam.

Un troisième programme a été réalisé afin de permettre l'affichage des données. Il échantillonne les niveaux soit linéairement, soit en appliquant une fonction logarithmique. La fonction logarithmique permet de simuler la réponse de l'œil. Nous obtenons une image de 4096\*4096 pixel où l'information est codée sur 256 niveaux de gris. Le noir (= niveau 0) correspond aux niveaux de luminance les plus faibles et le blanc (= niveau 255) correspond au niveau le plus lumineux. Le point le plus lumineux est soit calculé en fonction de la carte de valeur du point lumineux le plus élevé dans la carte de luminance à illustrer, soit il est fixé manuellement afin de permettre la comparaison de plusieurs cartes entre elles.

Les interfaces des différents programmes sont disponibles en annexe 1.

## L'étalonnage

L'ensemble du système a nécessité un étalonnage rigoureux. De par la complexité du système, plusieurs aspects doivent être pris en compte : la partie optique (réponse de la matrice CCD, l'impact des densités neutres, et du filtre  $V(\lambda)$ , la transmission de l'objectif,...) et la partie géométrique, (variation des angles de champs, la perpendicularité des axes de rotation, l'uniformité de la réponse du CCD, les déformations de l'objectif,...).

### Etalonnage optique

Caractérisation en transmission des éléments suivants : l'objectif, les quatre densités neutres, le filtre  $V(\lambda)$ .

Ci-dessous (Figure 42 ) la réponse spectrale des quatre densités neutres:

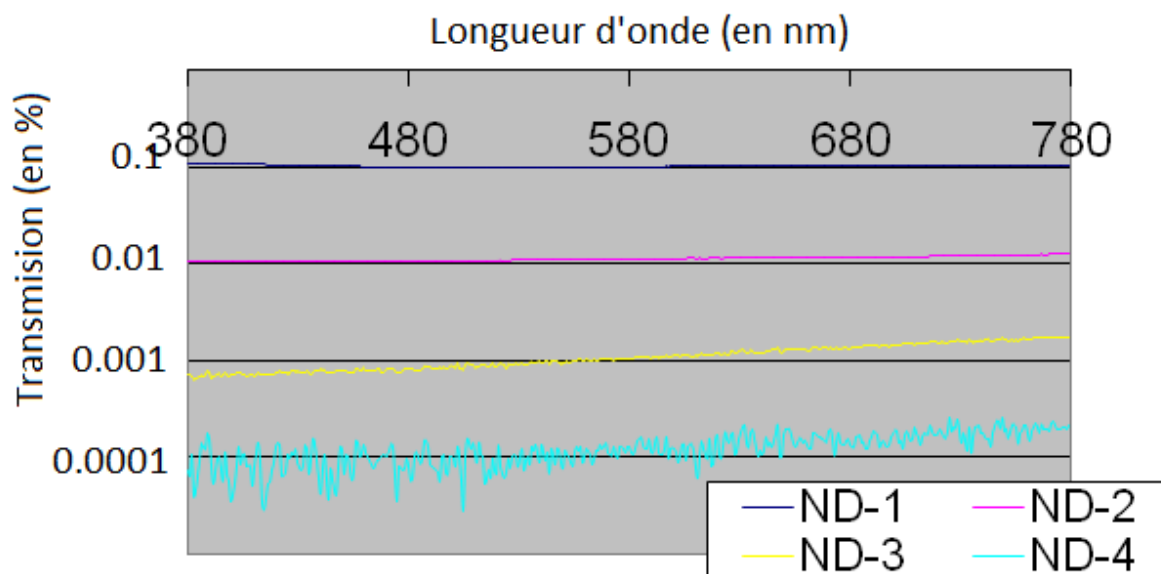


Figure 42 La transmission relative de chacune des densités optiques

Pour mesurer les distributions relatives de luminance lumineuse, la précision photométrique absolue n'est pas nécessaire. Une vérification de la sensibilité spectrale a été comparée entre le produit de la transmission du filtre par la sensibilité spectrale typique du capteur et la courbe du constructeur (Figure 43 ).

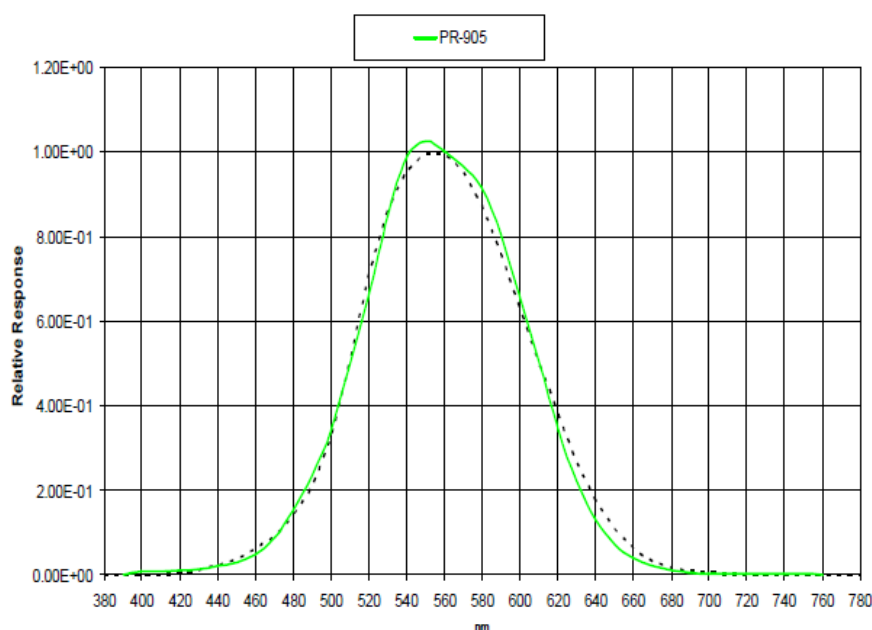


Figure 43 Réponse spectrale de la caméra (capteur +filtre V(λ)) - données constructeur

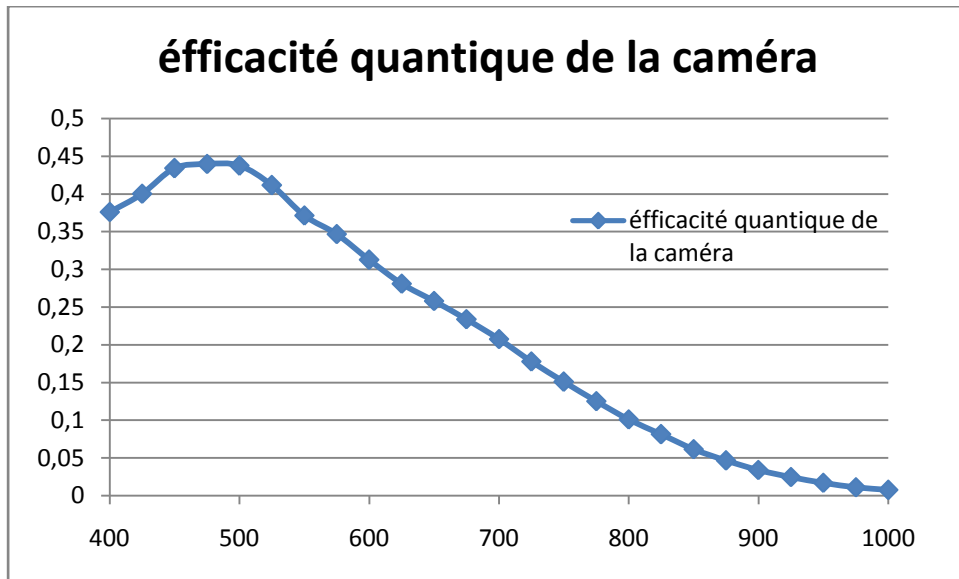


Figure 44 Sensibilité du capteur CCD.

Réponse spatiale :

Les angles de champs changent en fonction de la mise au point. Pour obtenir les angles de champs, nous avons utilisé deux méthodes :

- La première consiste à mesurer les angles à partir de la prise d'image d'une mire quadrillée en connaissant la distance séparant la mire de la caméra.
- La deuxième méthode permet d'effectuer des rotations de la caméra pour déplacer un objet fixe dans le champ de la caméra.

Ces mesures ont été effectuées pour différentes mises au point et donc à différentes distances. La Figure 45 montre le résultat des deux méthodes. La moyenne de chacune des méthodes a été effectuée et une courbe de tendance a été déterminée.

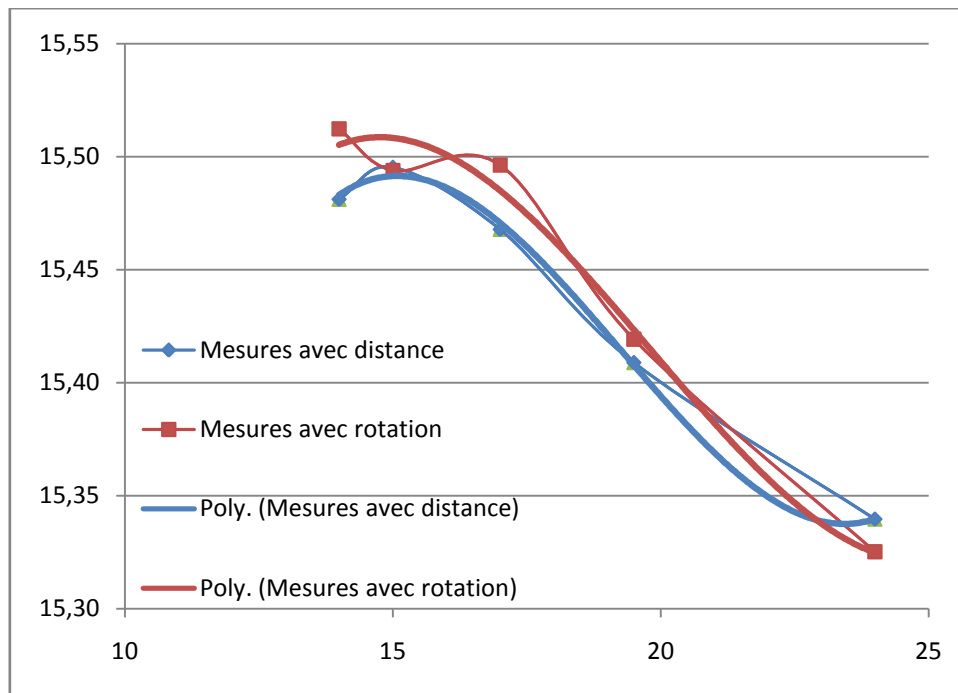


Figure 45 Angles de champs en fonction de la mise au point pour les deux méthodes

Nous avons étudié l'impact des éléments qui suivent sur la réponse de la camera. Une matrice 16 x 16 d'uniformité a été déterminée pour chaque position de mise au point de l'objectif. Une surface élémentaire de l'ouverture d'une sphère intégrante a été imagée sur le capteur CCD et déplacée au moyen des platines de rotation. Pour corriger l'uniformité, on utilise une interpolation bilinéaire de la matrice d'uniformité de 16 points par 16.

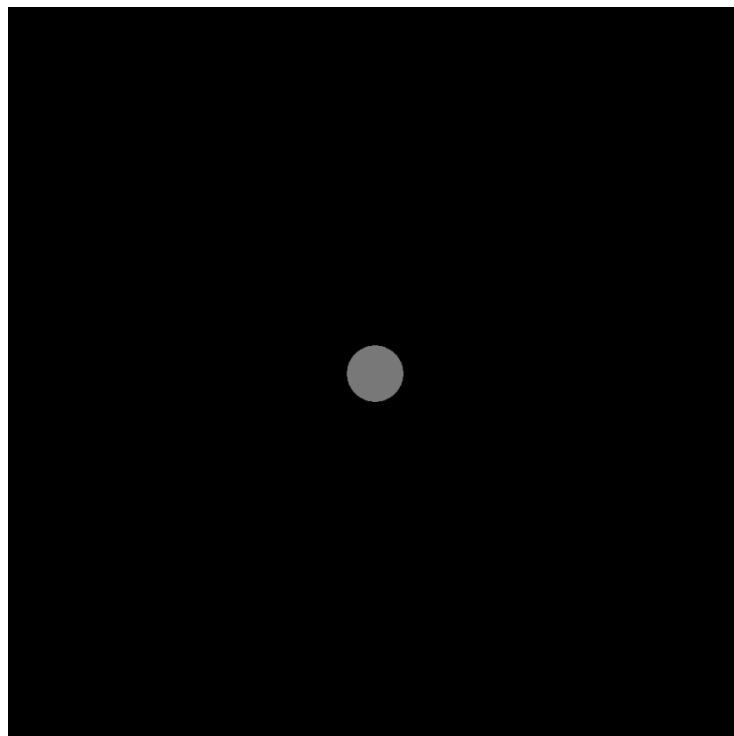


Figure 46            Une des images de la sphère d'intégration permettant de déterminer une des valeurs de la matrice de correction

Ainsi la figure suivante (Figure 47 ) montre (à gauche) la variation de la réponse de la caméra engendrée par l'objectif (vignettage). A droite, nous avons évalué l'uniformité, la mesure du noir et le bruit de la réponse du capteur et ceci pour plusieurs temps d'intégration et niveau lumineux.

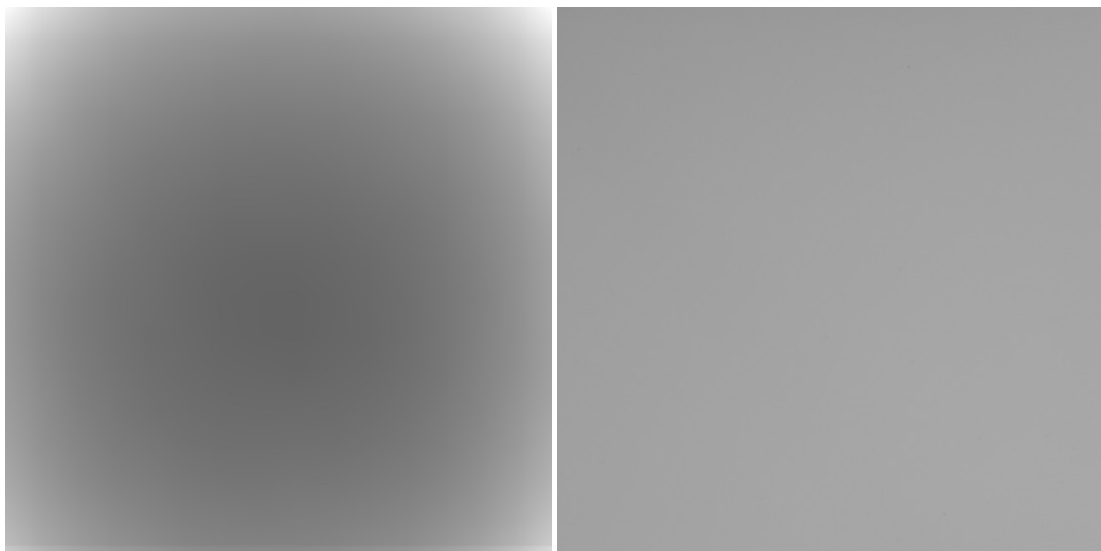


Figure 47            Gauche : Réponse optique causée sur le capteur à cause de l'objectif.  
Droite : Réponse du capteur sans objectif

Une étude a aussi été menée pour déterminer les erreurs des axes de rotation et pour corriger les recouvrements inter-images.

L'image ci-dessous (Figure 48 ) montre l'impact de certains de ces paramètres avant (à gauche) et après les corrections nécessaires (à droite) :





Figure 48 Scène sans correction (gauche) et scène corrigée (droite)

## Bilan de l'outil

Au début de cette réalisation, nous avons envisagé l'utilisation d'un appareil photo. Cependant, les filtres RGB disposés sur le capteur des appareils grand public ne permettent pas d'avoir autant de précisions qu'un capteur associé à un vrai filtre  $V(\lambda)$ .

Par ailleurs, l'utilisation d'un objectif fish-eye aurait été nécessaire pour faire des prises de vue grand angle. Cette solution présente deux contraintes : il comporte souvent des atténuations dans les grands angles et nous aurions été limités par la résolution du capteur lors de nos prises d'images.

De plus, le Goniocam étant basé sur plusieurs densités optiques, il présente une dynamique lumineuse plus importante qu'un simple capteur CCD. Cette particularité est essentielle compte tenu de l'intensité de certains points sources des LED.

Quelques mesures comparatives entre le Goniocam et un luminance mètre (LMT 1009) en différents points visuels du champ ont été effectuées. Elles montrent une concordance satisfaisante entre les deux appareils de mesures.

## Tête optique

Le CDS 2100 est un spectro-radiomètre à fibre optique. Une tête optique vient collecter la lumière. Celle-ci est transmise à l'aide d'une fibre optique au boîtier qui vient analyser la composition spectrale de l'information lumineuse. La présentation du CDS étant déjà effectuée, nous allons maintenant présenter la réalisation et la caractérisation de la tête optique réalisée au LNE. Cet élément a un rôle essentiel car c'est lui qui détermine la participation de chaque photon, en fonction de son incidence. Le but est ici de caractériser l'environnement lumineux tel que le voit un observateur dans une position et une direction

connue de l'œil. Ainsi il est important que cette tête optique prenne en considération l'ensemble des objets présents dans la scène. Pour répondre à ces problématiques, nous nous sommes orientés vers la réalisation d'une tête dite « en cosinus ». Ce genre d'élément améliore la réponse cosinus de la tête optique en fonction de l'angle d'entrée des rayons lumineux.

Nous avons caractérisé des matériaux diffusants et réalisé des pièces mécaniques permettant de régler la position de ceux-ci à différentes hauteurs. Nous avons réalisé des caches pour améliorer la réponse en angles.

Après cette réalisation, nous avons caractérisé la réponse en angles de la tête optique. Pour ce faire, nous avons placé la tête optique sur un banc optique et à une distance de 2 mètres d'une source lumineuse de petite taille qui pourra être assimilé à un point source. Nous faisons ensuite tourner la tête optique pour que l'incidence des rayons lumineux varie. Ci-dessous (Figure 49 ) la courbe des résultats obtenus comparée avec un cosinus.

La CIE a défini un facteur de qualité pour les têtes à réponse cosinus: le facteur  $f_2$  qui est défini ainsi: Soit  $\varphi$  l'azimut et  $\varepsilon$  l'angle à la normale

$$f_2(\varepsilon, \varphi) = \frac{Y(\varepsilon, \varphi)}{Y(0, \varphi) \cos(\varepsilon)} - 1 \quad \text{Équation 14}$$

$$f_2 = \int_0^{\frac{85^\circ \pi}{180}} |f_2(\varepsilon)| \sin(2\varepsilon) d\varepsilon \quad \text{Équation 15}$$

Plus ce facteur est faible, meilleur est la réponse. Nous obtenons un facteur  $f_2$  de 2,47, ce qui est très acceptable.

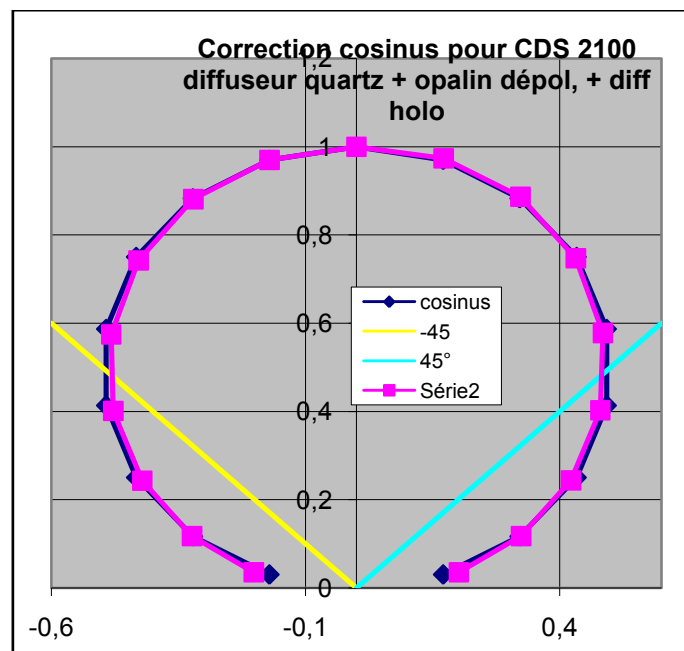


Figure 49 Réponse en coordonnées polaires de la tête optique

# Etat de l'art de la mesure de la qualité des éclairages

Les outils de mesures physiques présentés ci-dessus apportent des informations quantitatives comme le flux, la répartition spectrale, la distribution de la luminance mais non qualitatives comme le rendu des couleurs et le confort visuel.

Notre recherche s'est concentrée sur l'étude des métriques de rendu des couleurs et de confort visuel. Nous avons d'abord procédé à un état de l'art dans les deux domaines. Pour le rendu des couleurs nous avons fait une sélection de métriques à évaluer.

Les métriques sélectionnées sont introduites et détaillées dans les parties suivantes, la première relative au rendu des couleurs et la seconde au confort visuel. Nous n'aborderons pas dans cette recherche l'influence de la lumière sur le rythme circadien qui relève plus du domaine du bien être du corps que de la sensation de confort. Le « flicker » ou papillotement ne sera pas non plus abordé afin de nous concentrer sur des notions aux impacts directs sur le confort visuel comme l'éblouissement par exemple.

Nous concluons en indiquant les indices qui semblent les plus congruents.

## Le rendu des couleurs

Les premières mesures du rendu des couleurs ont été définies dans les années 1960. La CIE a proposé un indice de rendu des couleurs (IRC) en 1965[VIII], qu'elle a réédité jusqu'en 1995 [IX][X].

Des nouvelles technologies d'éclairage ont été mises régulièrement sur le marché (lampes fluorescentes, DEL,...) et la CIE ainsi que d'autres acteurs du domaine de l'éclairage recommandent de ne pas utiliser l'IRC pour les nouvelles technologies telles que les DEL[XII][XIV].

Depuis la publication du premier indice de la CIE des nouvelles métriques ont été proposées et l'activité de la CIE s'est amplifiée pour définir un nouvel indice le plus rapidement possible depuis l'apparition des DEL.

D'autres recherches sont nécessaires pour mieux évaluer d'une part la fidélité et, d'autre part, la préférence de l'apparence colorée des objets sous un éclairage artificiel représentant toutes les technologies.

L'IRC est une métrique fondée sur la fidélité des couleurs par rapport à un illuminant de référence. D'autres attributs ont été introduits pour quantifier l'apparence colorée tel que le naturel des couleurs, la mémoire des couleurs, la vivacité, l'espace des couleurs reproductibles, l'harmonie...

Plusieurs métriques ont été développées. Elles sont basées sur la mesure de ces attributs avec des exploitations mathématiques différentes type de moyenne : arithmétique, géométrique, quadratique, médiane, combinaison, espace des couleurs considérées, classement des écarts colorimétriques.

Il y a deux familles d'attributs, ceux qui sont relatifs à la fidélité de l'apparence et ceux qui sont relatifs à l'amélioration de l'apparence.

Des couleurs plus vives peuvent être plus attrayantes mais moins fidèles.

Des couleurs plus vives peuvent être perçues comme plus proches de notre représentation individuelle de l'objet identifié qui paraîtra alors, sur le plan de la perception, fidèle à l'image que l'on s'en fait et donc plus naturel.

## Métriques fondées sur une source de référence

Le principe de ces métriques est basé sur la comparaison des coordonnées colorimétriques d'échantillons colorés éclairés(i) par la source à évaluer et (ii) par une source de lumière de référence. La distance des coordonnées colorimétriques obtenue avec la source testée et avec la référence définit l'erreur du rendu de la couleur testée comparativement à la référence. Par conséquent, ces méthodes évaluent la fidélité des couleurs par rapport à une source de référence. Elles peuvent être modifiées pour mieux prendre en compte les aspects subjectifs comme l'indice « flattery » ou certaines composantes de la préférence de couleurs comme la vivacité des couleurs dans le CQS (ColourQualityScale). Elles vont donc s'écarter du principe de fidélité. La source de référence est choisie soit parmi un radiateur de Planck soit comme un illuminant de lumière de jour à la température de couleur (CCT) de la source de lumière à tester.

La métrique « CIE CRI » est jusqu'à présent la seule méthode acceptée internationalement pour quantifier le rendu des couleurs. Il s'agit du Colour Rendering Index (CRI), ou de l'indice du rendu des couleurs en français. Il a été établi par la CIE en 1965. C'est la première des méthodes fondées sur la comparaison avec une source de référence. Elle a été mise à jour

plusieurs fois notamment à cause de l'évolution de la colorimétrie. De nombreuses autres méthodes ont été développées en partant des mêmes principes. Les principales caractéristiques du CRI sont décrites dans la sous-section suivante. Nous énoncerons ensuite d'autres métriques basées sur des sources de référence, puis nous introduirons les métriques ayant un système différent.

Indice de rendu des couleurs ou "Color Rendering Index" (CRI de la CIE):

La métrique de la CIE est strictement une méthode de calcul d'écart colorimétrique. Lors du développement du CRI, l'objectif est d'évaluer la performance du rendu des couleurs des lampes fluorescentes émergentes. Cette métrique compare ainsi des échantillons colorés éclairés par la source de lumière test avec celle d'une lumière de référence. Les coordonnées colorimétriques obtenues avec la source de référence sont utilisées en tant que valeur théorique. A partir de ces données est calculé un écart colorimétrique avec les coordonnées obtenues avec la source en test. Enfin une formule permet de calculer un score global en fonction des écarts obtenus sur chaque échantillon de couleurs [VIII].

Deux types d'illuminants de référence peuvent être utilisés : (i) un radiateur de Planck et (ii) un illuminant D standardisé de lumière du jour défini par la CIE. L'illuminant de référence doit avoir une température de couleur (TCP) la plus proche de la source testée. Si la TCP est supérieure à 5000K, un illuminant de lumière du jour sera choisi. Si elle est inférieure à 5000K, la référence aura un spectre d'émission relatif correspondant au spectre émis par un radiateur de Planck de la même TCP.

L'étape suivante consiste à calculer les coordonnées trichromatiques de huit échantillons colorimétriques de base et de six échantillons colorimétriques de couleurs supplémentaires. Ce calcul s'effectue pour la source de référence et pour la source à évaluer.

Ensuite est effectué le calcul des écarts de couleurs  $\Delta E_i$ , dans l'espace colorimétrique CIE 1960 UCS.

**Indice général:**

$$R_a = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 R_i \quad \text{Équation 16}$$

$R_i$  est l'indice spécifique:

$$R_i = 100 - 4,6 \Delta E_i \quad \text{Équation 17}$$

$\Delta E_i$  est défini par l'équation suivante où  $\Delta U_i^*$ ,  $\Delta V_i^*$ ,  $\Delta W_i^*$  sont les écarts colorimétriques :

$$\Delta E_i = \sqrt{\Delta U_i^{*2} + \Delta V_i^{*2} + \Delta W_i^{*2}} \quad \text{Équation 18}$$

**Les échantillons colorés utilisés ou Test Colour Samples (TCS) (Table 3) :**

TCS de base: TCS1 – TCS8

TCS supplémentaires (non utilisés pour le calcul du CRI): TCS9 – TCS14

TCS	TCS	TCS	TCS	TCS	TCS	TCS	TCS	TCS	TCS	TCS	TCS	TCS	TCS
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
7.5 R	5 Y	5 GY	2.5 G	10 BG	5 PB	2.5 P	10 P	4.5 R	5 Y	4.5 G	3 PB	5 YR	5 GY
6/4	6/4	6/8	6/6	6/4	6/8	6/8	6/8	4/13	8/10	5/8	3/11	8/4	4/4

Table 3 Coordonnées de Munsell

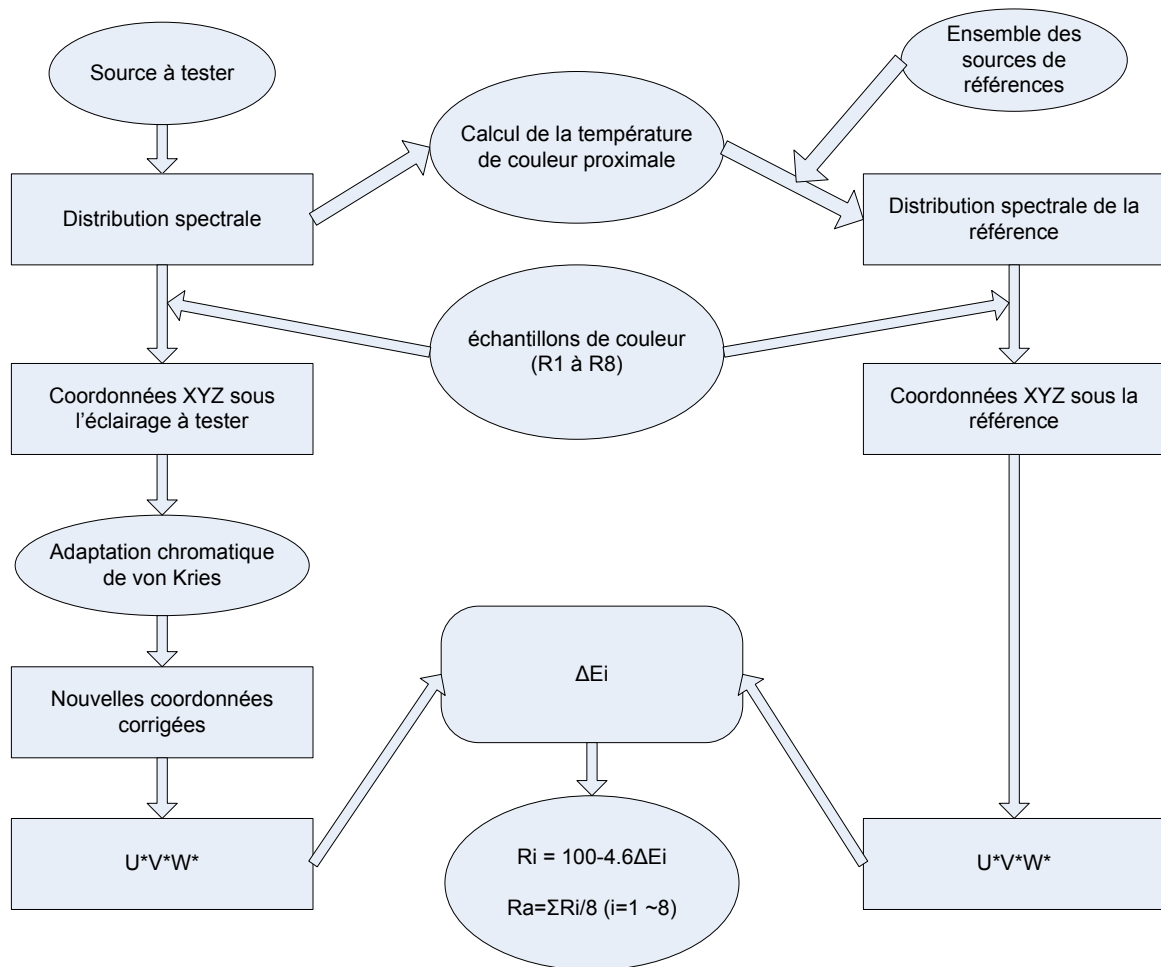


Figure 50

Diagramme de fonctionnement de l'indice de rendu des couleurs

Révisions approuvées de 1974 & 1995[IX][X]

En 1974, la CIE publie une révision de sa méthode en conservant la base précédente mais en y ajoutant une adaptation chromatique de Von Kries : Chromatic Adaptation Transform (CAT)

Le diagramme ci-dessus (Figure 50 ) décrit les étapes de calcul avec cette adaptation.

Ainsi, la CAT de Von Kries s'applique sur les TCS afin d'obtenir les coordonnées chromatiques en ayant compensé la différence chromatique entre l'illuminant de référence et l'illuminant en test. La méthode de 1974 fait l'objet d'une nouvelle publication en 1995 pour corriger des fautes d'impression et tenir compte des évolutions de la pratique de la spectroradiométrie. Les recommandations techniques n'ont pas été changées. L'adaptation chromatique est calculée suivant les équations suivantes :

$$u'_{k,i} = \frac{10.872 + 0.404 \frac{c_r}{c_k} c_{k,i} - 4 \frac{d_r}{d_k} d_{k,i}}{16.518 + 1.481 \frac{c_r}{c_k} c_{k,i} - \frac{d_r}{d_k} d_{k,i}} \quad \text{Équation 19}$$

$$v'_{k,i} = \frac{5.520}{16.518 + 1.481 \frac{c_r}{c_k} c_{k,i} - \frac{d_r}{d_k} d_{k,i}} \quad \text{Équation 20}$$

$$c = \frac{1}{v} (4 - u - 10v) \quad \text{Équation 21}$$

$$d = \frac{1}{v} (1.708v + 0.404 - 1.481u) \quad \text{Équation 22}$$

Proposition de révision de 1999[XV]:

Le principe reste le même que dans les versions précédentes, néanmoins :

-Les illuminants de référence sont sélectionnés parmi six sources : deux spectres de lumière du jour (D65, D50), ou un des quatre corps-noir (p4200, p3450 p2950 et p2700). On utilise

celui qui se trouve le plus proche de la source à évaluer dans l'espace colorimétrique CIELAB.

- Un nouveau jeu de huit TCS provenant de la charte Macbeth Color Checker complétée par deux teintes chair (caucasien et oriental)

- Une nouvelle adaptation chromatique : transformation de Bradford

-Le calcul du  $R_a$  est revu.

-Tous les paramètres colorimétriques x, y, Y sont transformés dans l'espace colorimétrique CIELAB

Ainsi :

**Indice Général:**

$$R96_a = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} R_{i96} \quad \text{Équation 23}$$

Indice spécifique :

$$R_i = 100 - c\Delta E_i^* \quad \text{Équation 24}$$

$c(R96_a(c)) = 3,248$ , lorsqu'on utilise une des six sources de référence citée ci-dessus (Table 4).

$c(R_{a96}(TCC/LAB)) = 3,032$ , lorsque la méthode utilise la lumière ou le corps noir le plus proche.

**Les TCS :**

TCS No.	TCS 1	TCS 2	TCS 3	TCS 4	TCS 5	TCS 6	TCS 7	TCS 8	TCS 9	TCS 10
Couleur Checker No.	MCC 15	MCC 7	MCC 16	MCC 11	MCC 14	MCC 18	MCC 13	MCC 17	Couleur de peau Caucasian	Couleur de peau Orientale
notation de Munsell	5 R 4/12	5 Y 6/11	5 Y 8/11.1	5 GY 7.08/9.1	0.1G 5.38/9.65	5 B 5/8	7.5 PB 2.9/12.75	2.5 RP 5/12		

Table 4 TCS utilisés pour le calcul du CRIRa96



### Color preference index (CPI)

Cette métrique [I][LVII] est similaire à la première version du CRI de la CIE de 1965, mais les échantillons de couleurs testés sont ceux préférés sous l'illuminant de référence.

Les TCS sont sélectionnés dans les huit premiers du CRI (TCS1 à TCS8). La mise à l'échelle est effectuée pour obtenir un CPI de 100 avec la source de référence. Certaines sources dépassant la source de référence peuvent obtenir des résultats allant jusqu'à 156.

Cette méthode n'a pas été mise à jour avec la dernière version du CRI de la CIE. Elle n'est pas recommandée par la CIE.

### Indice général :

$$CPI = 156 - 7.18(\overline{\Delta E}) \quad \text{Équation 25}$$

$\overline{\Delta E}$  : Écart colorimétrique moyen.

### Color quality scale (CQS)

La sélection des illuminants de référence est la même que pour le CRI. L'adaptation chromatique s'effectue en appliquant le CMCCAT2000. Les coordonnées trichromatiques sont, après l'adaptation chromatique, calculées à partir des TCS (Table 5) illuminés sous sa source à évaluer puis transformés dans l'espace colorimétrique CIELAB. Ensuite les différences de couleurs sont effectuées tout en ne comptant pas l'augmentation de saturation. Pour ne pas obtenir de valeurs négatives, le CQS calcule l'erreur quadratique moyenne. De plus, un dernier facteur est appliqué pour prendre en considération la température de couleur. Le calcul des différences de couleurs ne pénalise pas l'augmentation de saturation des couleurs [XVIII][XIX][XX].

$$\Delta E_{ab,i,sat} = \Delta E_{ab,i}, \quad si \quad \Delta C_{ab,i} \leq 0, \quad \text{Équation 26}$$

$$\Delta E_{ab,i,sat} = \sqrt{(\Delta E_{ab,i})^2 - (\Delta C_{ab,i})^2}, \quad si \quad \Delta C_{ab,i} > 0, \quad \text{Équation 27}$$

$$\Delta C_{ab,i} = C_{ab,i,test} - C_{ab,i,ref} \quad \text{Équation 28}$$

### Association des différences colorimétriques

$$\Delta E_{rms} = \sqrt{\frac{1}{15} \sum_{i=1}^{15} (\Delta E_{ab,i,sat})^2} \quad \text{Équation 29}$$

Première compilation

$$Q_{a,rms} = 100 - 3.1 \times \Delta E_{rms} \quad \text{Équation 30}$$

Application d'une fonction logarithmique pour obtenir un résultat positif

$$Q_{a,0-100} = 10 \ln[\exp(Q_{a,rms}/10) + 1] \quad \text{Équation 31}$$

**Indice général:**

$$Q_a = M_{CCT} Q_{a,0-100} \quad \text{Équation 32}$$

Pour  $T < 3500$  K

$$M_{CCT} = T^3 (9.2672 \times 10^{-11}) - T^2 (8.3959 \times 10^{-7}) + T (0.00255) - 1.612 \quad \text{Équation 33}$$

Pour  $T \geq 3500$  K

$M_{CCT} = 1$

**Les TCS:**

TCS 1	TCS 2	TCS 3	TCS 4	TCS 5	TCS 6	TCS 7	TCS 8
7.5 P 4/10	10 PB 4/10	5 PB 4/12	7.5 B 5/10	10 BG 6/8	2.5 BG 6/10	2.5 G 6/12	7.5 GY 7/10

TCS 9	TCS 10	TCS 11	TCS 12	TCS 13	TCS 14	TCS 15
2.5 GY 8/10	5 Y 8.5/12	10 Y 7/12	5 YR 7/12	10 R 6/12	5 R 4/14	7.5 RP 4/12

Table 5 Les TCS utilisés par le CQS

CRICAM02UCS

La méthode est la même que pour le CRI 1999, mais en utilisant l'espace couleur et les écarts colorimétriques de l'espace CAM02-UCS dérivé du CAM02 de la CIE [XXXV][XXXVI][XXXVII]. Plusieurs expériences subjectives ont été réalisées avec l'utilisation de sources à DEL, de sources classiques et des simulateurs de lumière du jour.

**Détail d'implémentation:**

$$\Delta E(\text{CAM02} - \text{UCS}) = \sqrt{\Delta J'^2 + \Delta a'_M{}^2 + \Delta b'_M{}^2} \quad \text{Équation 34}$$

**Indice général:**

$$\begin{aligned} \text{CRI} - \text{CAM02UCS} &= \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 R_i \\ R_i &= 100 - 8.0 \Delta E(\text{CAM02} - \text{UCS})_i \end{aligned} \quad \text{Équation 35}$$

New Color Rendering Index (nCRI / CRI 2012)

Cette métrique se fonde sur la précédente méthode de la CIE mais comporte certains changements qui sont : (1) l'utilisation de plusieurs jeux de TCS en fonction de la finesse du résultat souhaité. Par défaut, elle utilise un jeu de 17 échantillons mathématiques. D'autres jeux de 17, 210 et 1000 échantillons réels peuvent être aussi utilisés, (2) l'application de la moyenne quadratique dans le calcul de la différence des couleurs de ces échantillons :

$$\Delta E_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Delta E_i^2)} \quad \text{Équation 36}$$

Indice général:

$$R_{a,2012} = 100 \cdot \left( \frac{2}{e^{k \cdot |\Delta E_{RMS}|^{1.5}} + 1} \right)^2 \quad \text{Équation 37}$$

Indices spécifiques :

$$R_{i,2012} = 100 \cdot \left( \frac{2}{e^{k \cdot |\Delta E_i|^{1.5}} + 1} \right)^2 \quad \text{Équation 38}$$

## Méthodes fondées sur le gamut

Le principe de ces méthodes est de mesurer l'aire occupée par les coordonnées des TCS dans un espace colorimétrique donné. Une plus grande surface devient synonyme d'une capacité à rendre un plus grand nombre de couleurs. Néanmoins, aucune de ces métriques n'aborde le problème du point de vue de la fidélité des couleurs.

### Color Discrimination Index (CDI)

C'est une méthode basée sur le gamut [I][LVIII]. L'indice quantifie la surface enveloppée par les TCS utilisés par la CIE dans le CRI, dans l'espace colorimétrique uv. L'indice calcule l'aire du gamut.

L'Indice général:

$$GA = 0.5 \left[ (u_1 v_2 - u_2 v_1) + (u_2 v_3 - u_3 v_2) + (u_3 v_4 - u_4 v_3) + (u_4 v_5 - u_5 v_4) + (u_5 v_6 - u_6 v_5) + (u_6 v_7 - u_7 v_6) + (u_7 v_8 - u_8 v_7) + (u_8 v_1 - u_1 v_8) \right] \quad \text{Équation 39}$$

Le CDI est calculé ainsi :

$$CDI = \frac{GA}{0.005} 100 \quad \text{Équation 40}$$

L'aire du gamut pour l'illuminant C est d'environ 0.005, ainsi le CDI est normalisé à 100 pour l'illuminant C.

### Colour rendering capacity (CRC)

Cette métrique est une mise à jour de la méthode proposée en 1976 [I][LXV]. La nouveauté de la mise à jours de 1983 est l'utilisation de l'espace CIE 1976 L\*u\*v\*. Elle consiste à associer une infinité d'échantillons de couleurs - dites solides - en les considérant sous la source à évaluer.

**Détails de l'implémentation:** Premièrement, la surface est formée par le calcul des couleurs en utilisant le spectre de la source testée. La surface utilisée pour le calcul des couleurs est effectuée en prenant le spectre conjugué aux fonctions de la réflexion des couleurs optimum. Les couleurs solides sont définies dans l'espace  $L^*u^*v$  avec  $L$  entre 0 et 100. Le volume de ces couleurs solides est calculé avec une unité arbitraire. Le résultat est normalisé de telle sorte que le volume d'un spectre de même énergie soit égal à 1.

Conclusion des auteurs : l'illuminant D65 a un meilleur CRC qu'un illuminant A. Néanmoins ces deux illuminants obtiennent la même note dans la métrique du CRI CIE. Une source avec une distribution obtenant un bon CRC a des chances d'obtenir de bons résultats.

#### Cone Surface Area

La métrique des « Cone Surface Area » (CSA) [I][XXV] combine la mesure de l'aire du gamut avec celle de la chromaticité dans l'espace couleur de 1976 de la CIE  $u^*v^*$ . Le CSA correspond donc à la surface des cônes qui ont une aire circulaire de la même surface que le gamut et avec une hauteur correspondant au paramètre chromatique  $w^*$ .

**Détails de l'implémentation:**

**Indice général:**

$CSA = \text{aire de la base} + \text{aire de la surface incurvée}$

$$\boxed{CSA = \pi r^2 + \pi r L} \text{Équation 41}$$

$\pi r^2$  : Aire de base

$\pi r L$  : Aire de la surface incurvée

$r$  : rayon de base, estimé par l'aire du gamut selon l'équation suivante:

$$\boxed{r = \sqrt{\frac{GA}{\pi}}} \text{Équation 42}$$

$L$  : la longueur de la pente du cône définie ainsi:

$$L = \sqrt{r^2 + w'^2} \quad \text{Équation 43}$$

$w'$  : hauteur perpendiculaire du cône :

$$w' = 1 - (u' + v') \quad \text{Équation 44}$$

### Feeling of Contrast Colour Rendering Index (FCI)

Cette métrique [XXIX] est basée sur le principe de l'augmentation du sentiment du contraste ainsi que sur l'augmentation de la sensation de la saturation des couleurs. Le FCI estime que la sensation du contraste est fonction de l'aire du gamut pour quatre échantillons colorés de l'atlas de Munsell hautement saturé : le rouge, le vert, le bleu et le jaune (Table 6).

Ces échantillons sont éclairés par la source à évaluer ( $GA_{\text{Test}}$ ) et par l'illuminant de référence D65 ( $GA_{\text{D65}}$ ).

Les valeurs tristimuli de l'illuminant testé sont transformées en utilisant le CIECAT94. L'aire du gamut est compilé dans l'espace  $L^*a^*b^*$  par l'addition des aires des triangles RGB et RGY.

Des expériences subjectives ont été faites en utilisant 20 sources évaluées en termes de contraste. Le FCI a été comparé au CRI Ra.

### **Indice Général :**

$$FCI = 100 \left( \frac{GA_{\text{Test}}}{GA_{\text{D65}}} \right)^{3/2} \quad \text{Équation 45}$$

### **TCS:**

TCS 1	TCS 2	TCS 3	TCS 4
5 R 4/12	5.5 G 5/8	5 Y 8.2/10	4.5 B 3.2/10

Table 6 Échantillons de couleurs du FCI

## Les métriques combinées

### Colour Rendering & Gamut Area Index (CRI & GAI)

Cette métrique [XLIV][XLV] combine le CRI et le GAI qui ont été décrites précédemment. Cette combinaison permet de prendre en compte les aspects de la fidélité et de la discrimination des couleurs.

L'indice du CRI n'a pas été changé par contre, l'aire du gamut de la référence est celle de l'EES (Equal Energy Stimulus) compilée avec les TCS du CRI Ra 13.3.

$$GAI = 100 \left( \frac{GA_{test}}{GA_{EES}} \right) \quad \text{Équation 46}$$

Il y a eu trois expériences subjectives en 2007 : l'une utilisant des sources chaudes (CCT < 4000k), une autre utilisant des sources froides (CCT > 5000K) et la dernière utilisant des sources chaudes et froides. (12 personnes).

Les expériences consistaient à effectuer le test des 100 saturations farnsworth-Munsell, et de juger le naturel et la vivacité de reproductions d'animaux.

En 2010, une autre expérience subjective a été menée avec 18 personnes. Ces dernières devaient évaluer le naturel et l'attractivité de fruits et végétaux puis déterminer trois teintes qui les avaient influencées dans leur jugement.

L'auteur conclut qu'une bonne source de lumière doit avoir un CRI>100 et un GAI entre 80 et 100.

### Rank Order Colour Rendering Index (RCRI)

Cette méthode [III][IV] utilise les différences de couleurs du CRI-CAMUCS. Pour chaque TCS (1 à 17) les cinq différences absolues sont calculées. Les plus petites correspondent au classement (1 à 5) ; puis les numéros de classement (N1, N2,...) sont compilés pour les 17 TCS et utilisés pour l'indice général. Les 17 TCS viennent de la charte Macbeth et du CQS.

$$\Delta E(\text{CAM02} - \text{UCS}) = \sqrt{\Delta J'^2 + \Delta a_M'^2 + \Delta b_M'^2} \quad \text{Équation 47}$$

### Indice général :

$$RCRI = 100 \left( \frac{N_1 + N_2}{17} \right)^{1/3} \quad \text{Équation 48}$$

Plusieurs expériences subjectives ont été réalisées utilisant des sources ayant des CCT proches de 2700K et 4500K. Ces expériences ont permis d'établir les différences de jugement des couleurs et de leur validation. L'auteur conclut que le RCRI obtient de plus faibles valeurs que le CRI Ra, CQS, CRI-CAMUCS, sauf pour les sources d'une certaine qualité et tout en gardant le même ordre que le CRI. Le RCRI obtient une performance de 73% dans un jugement global. Une alternative a été proposée mais pas encore validée.

### Approche statistique du rendu des couleurs

#### Categorical Colour Rendering Index (CCRI)

La catégorisation des couleurs joue un rôle important dans de nombreuses applications pratiques. Le nom des couleurs est considéré comme l'un des critères de l'apparence colorée indépendamment des conditions de vision. Le but de cet indice est de prendre en compte la catégorisation des couleurs plutôt que leurs différences pour évaluer la qualité d'une source lumineuse.

Cette métrique [LXVI][LXVII][LXVIII] utilise 11 catégories de couleurs réparties dans 4 régions différentes reliées dans le plan « Ch » de l'espace des couleurs CIECAM97. Tout d'abord, sous l'illuminant D65, quatre échantillons de couleurs sont déterminés et liés à l'élément 'i' pour chaque catégorie. Puis on établit le paramètre « Si » correspondant à chaque région du plan « Ch ». Ces échantillons de couleurs sont utilisés pour compiler le paramètre « St » sous la source à évaluer. L'indice spécifique est établi par le rapport de l'intersection de « St » avec « Si » divisé par « St ».

$$CCRI_i = 100 \bullet \frac{Si \cap St}{St} \quad \text{Équation 49}$$

L'indice général est la moyenne des indices spécifiques:

$$CCRI = \left( \sum_{i=1}^{21} CCRI_i \right) / 21 \quad \text{Équation 50}$$



**TCS:** 292 échantillons provenant de l’atlas de Munsell (brillant).

#### Approche statistique du rendu des couleurs

Cette approche utilise la température de couleur pour former la 4-D métrique ainsi que les trois métriques suivantes :

- colour fidelity index (CFI),
- colour saturation index (CSI),
- hue distortion index (HDI).

Ces indices sont compilés en prenant les vecteurs de rendu des couleurs. Pour déterminer la source de référence, on utilise la même méthode que la métrique de la CIE CRI 13.3 tout en appliquant l’adaptation chromatique CAT.

La compilation du CFI se sert d’un cylindre elliptique dans l’espace Yxy avec un seuil de luminance de 0.7% et l’ellipse interpolée des ellipses de Mac Adams. Le CSI et le HDI exploitent l’amplitude et la direction des vecteurs du rendu des couleurs.

L’indice général considère les pourcentages du CFI, CSI et HDS parmi tous les échantillons colorés

**TCS:** 1269 échantillons provenant de l’atlas de Munsell (mat)

#### Approche basée sur l’harmonie des couleurs

##### Harmony rendering index (HRI)

Cette méthode évalue la différence entre l’harmonie des couleurs d’une source test et d’une source de référence [LIV][LV][LVI]. L’harmonie des couleurs est établie à partir d’une formule d’harmonie prédictive s’appliquant à des paires ou trio de couleurs monochromatiques, dichromatiques et trichromatiques (CHF<sub>2M</sub>, CHF<sub>2D</sub>, CHF<sub>3M</sub>, CHF<sub>3T</sub>). Elles sont calculées dans l’espace des couleurs CIECAM02 en utilisant les facteurs (J, C, H).

Pour déterminer la source de référence, on utilise la même méthode que la métrique de la CIE CRI 13.3.

##### **Indice général:**

$$R_{hr} = 100 - k * \sum_{i=1}^n CHF_{i,ref} - CHF_{i,test} \quad \text{Équation 51}$$

CHF<sub>i,ref</sub> calculé pour la référence

CHF<sub>i,test</sub> calculé pour la source test

Des publications récentes utilisent la valeur absolu de la différence CHF<sub>i,ref</sub> - CHF<sub>i,test</sub>.

**TCS:** 17 paires d'échantillons provenant de l'atlas de Munsell (mat) et 5 trios d'échantillons provenant de l'atlas de Munsell (mat).

## Indices basés sur la mémoire des couleurs

L'indice du rendu des couleurs mémoire a été élaboré à partir de fonctions de similarités colorimétriques d'objets. Les fonctions de similarité des couleurs ont été établies par des expériences psycho-visuelles [XLVIII][XLIX][L][LI][LII][LIII].

Une première adaptation chromatique (CAT02 sur le tri stimulus de la CIE 1964 10°) transforme la source en D65 puis le résultat est transformé dans l'espace de couleur IPT en prenant en compte les distributions spécifiques de similarité Si(X) des objets.

$$S_i(X_i) = e^{-\frac{1}{2}[(X_i - \begin{pmatrix} a_{i,1} \\ a_{i,2} \end{pmatrix})^T \begin{pmatrix} a_{i,3} & a_{i,5} \\ a_{i,5} & a_{i,4} \end{pmatrix} (X_i - \begin{pmatrix} a_{i,1} \\ a_{i,2} \end{pmatrix})]} \quad (i = 1 \dots 10) \quad \text{Équation 52}$$

**Indice général:** l'indice général, R<sub>m</sub>, est compilé à partir du degré de similarité (S<sub>a</sub>) en utilisant la moyenne géométrique de chaque objet.

$$S_a = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n S_i} \quad \text{Équation 53}$$

$$R_{m,i} = 100 \cdot \left( \frac{2 \cdot e^{-p_1 \cdot d_i^{p_2}}}{(1 + e^{-p_1 \cdot d_i^{p_2}})} \right)^{p_3} \quad \text{avec } d_i = \sqrt{-2 * \ln(S_i)} \quad \text{Équation 54}$$

Cette métrique n'utilise pas de TCS, seule la réflexion spectrale des objets est utilisée : une pomme verte, une banane, une orange, de la lavande, une figurine de schtroumpf, un yaourt à la fraise, un concombre, un chou fleur et une teinte couleur chair. L'auteur a comparé avec

d'autres métriques existantes pour la valider et trouve qu'il obtient de meilleurs classements qu'avec le CIE Ra ou le CQS.

## Synthèse pour l'exploitation des métriques du rendu des couleurs

Nous pouvons classer les métriques selon différentes familles:

- celles de stricte fidélité par rapport aux éclairages de référence (CRI)
- les métriques dérivées de celles de la fidélité mais qui s'en écartent pour prendre en compte la préférence de certains aspects colorimétriques comme la vivacité des couleurs. (CPI, CQS)
- celles s'appuyant sur la couleur d'objets de référence (MCRI)
- celles qui combinent les deux aspects fidélité et vivacité. Un bon éclairage ayant la préférence des utilisateurs peut être moyennement fidèle mais plus saturé que la référence (métrique combinant CRI+GAI).
- celles qui s'appuient sur une qualité spécifique des éclairages comme l'harmonie des couleurs, le gamut (HRI, GAI)
- celles qui ont un traitement statistique sur un grand nombre de TCS (FDI)

Les métriques détaillées précédemment représentent les principales alternatives à l'indice actuel et officiel du rendu des couleurs (CIE CRI). Un certain nombre ont été retenues par la CIE comme de possibles candidates pour un nouvel indice. Elles doivent, pour la CIE, faire l'objet d'une évaluation plus poussée.

Nous avons retenu l'ensemble des métriques présentées pour notre étude sur le rendu des couleurs. L'implémentation de ces métriques nécessite :

- 1) les calculs colorimétriques dans plusieurs espaces chromatiques
- 2) le spectre des assortiments d'échantillons colorés
- 3) l'ensemble des spectres des illuminants de référence
- 4) les méthodes utilisées pour déterminer l'illuminant de référence
- 5) les adaptations chromatiques
- 6) des données expérimentales propres à ces méthodes (par exemple les fonctions de similarité du MCRI)

Ce travail d'étude peut être aussi consulté dans le document D3.1.1 du projet [ENG05]. Quatorze métriques ont été implémentées et appliquées à un jeu de 122 spectres d'éclairage, ainsi que sur les éclairages de notre expérience subjective. Les résultats sont présentés dans le quatrième chapitre.

## Le confort Visuel

Concernant le confort visuel, nous verrons qu'il y a peu d'indices permettant de l'évaluer comparativement aux indices sur le rendu des couleurs. L'éblouissement est un paramètre clé du confort et intéresse particulièrement la recherche. Il dispose donc de métriques. Les valeurs données par ces métriques appréciant l'éblouissement sont, elles aussi, remises en question avec l'apparition des nouvelles technologies. Enfin, nous décrirons les normes d'ergonomie de l'éclairage, qui fixent quelques principes à respecter pour minimiser les gênes occasionnées par les éclairages.

Nous allons ici présenter les métriques et les normes relatives au domaine du confort visuel. Contrairement au domaine de la couleur, celui du confort visuel est plus large et plus compliqué à établir. De ce fait, des indices ont été développés pour évaluer les éventuelles sources d'inconfort, tel que l'éblouissement ou le papillotement des sources. Les normes donnent des recommandations de manière générale sur certains aspects de l'éclairage qu'il est conseillé de mettre en place pour garantir un environnement opérationnel.

## Normes ergonomiques

Mise à part l'indice de l'UGR que nous venons de présenter, il existe très peu d'indices permettant d'évaluer les autres formes d'inconfort ou de confort. Il y a le problème du papillotement (flicker) dont plusieurs études - en cours de réalisation - tentent de mettre en place un indice pour le caractériser. Il existe aussi un ensemble de lois qui impose l'application de normes ergonomiques [LX][LXI][LXII] qui permettent de garantir un certain niveau de performance, et donc qui tentent de limiter les sources d'inconfort connues. On peut notamment citer :

Le décret n°83-721 du 2 août 1983 complétant le Code du Travail concerne l'éclairage des lieux de travail. Il est destiné aux chefs d'entreprises. Les dispositions de ce décret précisent :

- les valeurs minimales à respecter pour l'éclairage général dans quatre situations intérieures et deux situations extérieures

- le niveau d'éclairage doit être adapté à la nature et à la précision des travaux à exécuter (valeurs précisées par la circulaire du 11 avril 1984)
- le rapport entre les niveaux d'éclairage dans un même local
- la protection contre le rayonnement solaire
- les risques d'éblouissement ou de fatigue visuelle dus à des surfaces à forte luminance
- la qualité du rendu des couleurs
- les phénomènes de fluctuation de la lumière
- les risques d'effets thermiques et de brûlures
- l'accès des organes des commandes
- l'entretien du matériel d'éclairage

Le décret n° 83-722 du 2 août 1983 complétant le Code du Travail fixe les règles relatives à l'éclairage des lieux de travail auxquelles doivent se conformer les maîtres d'ouvrage entreprenant la construction ou l'aménagement de bâtiments destinés à l'exercice d'une activité industrielle, commerciale ou agricole. Ce décret aborde :

- l'utilisation de la lumière naturelle pour l'éclairage des locaux de travail
- la réalisation de bâtiments satisfaisant aux dispositions du décret n°83-721 concernant les niveaux d'éclairage et la facilité d'entretien du matériel d'éclairage
- la rédaction et la transmission au chef d'établissement utilisateur d'un document contenant les informations relatives au niveau d'éclairage et aux règles d'entretien du matériel.

## Les recommandations

En plus de la réglementation, les recommandations de l'Association Française de l'Eclairage (AFE) et les normes AFNOR servent de guides pour l'éclairage des lieux de travail:

- NF X 35-103 : Principe d'ergonomie visuelle applicable à l'éclairage des lieux de travail
- EN 12665 : Termes de base et critères pour les spécifications des exigences en éclairage
- NF EN 12464-1 : Eclairage des lieux de travail (détails de toutes les recommandations d'éclairage sur tous les types de lieux de travail)

Cette dernière précise - en fonction de l'environnement considéré - des seuils minimum de rendu des couleurs, d'éblouissement et de ratio de niveau de luminance à respecter pour garantir un minimum d'inconfort.

Enfin, on trouve dans la littérature [XVII][XXIII][XXVIII] un ensemble de précautions à prendre pour éviter de créer des situations trop inconfortables, notamment dans des ouvrages consacrés à l'éclairage des bâtiments [XXVII][LIX].

En considérant les normes et les recommandations du confort visuel citées ci dessus, il est apparu que certains indices n'étaient pas systématiquement en accord les uns avec les autres. J'ai donc choisi d'utiliser uniquement les indices liés à l'éblouissement qui est, lui, l'attribut du confort visuel le plus étudier.

## L'éblouissement

L'éblouissement est l'un des paramètres, influençant le confort visuel, qui présente un nombre important d'études. Historiquement, plusieurs entités ont développé leurs indices basés, pour la plupart, sur des expériences subjectives. CIBSE Glare Index, IES Glare Index, Daylight Glare Index (DGI), British Glare index (BGI), Discomfort Glare Index (DGI), visual comfort probability (VCP) sont les plus connus. Face à cette multitude d'indices, qui donnaient des résultats différents, il a été défini un indice reprenant les aspects de ces précédents indices, édité par la CIE : l'Unified Glare Ratio (UGR). Cet indice a été accepté mais, certaines interrogations perdurent quant à son utilisation pour des sources de géométrie particulière ou lors de combinaison de sources [VII].

Il existe d'autres métriques évaluant l'éblouissement mais pour d'autres niveaux comme l'éblouissement d'incapacité. Ces métriques concernent des niveaux d'éblouissement très importants, qui ne permettent pas à une situation d'être confortable. Par conséquence, nous n'aborderons pas ces indices.

### Unified Glare Ratio (UGR)

L'UGR [XI][XIII] est un indice qui permet d'évaluer l'éblouissement de sources lumineuses à un endroit et dans une direction donnée.

Comme son nom l'indique avec le terme « unified » il s'agit de l'association de plusieurs indices : BGI, CGI, VCP...

L'aboutissement de plusieurs études [I][VII][XXXII][XXX][XXXIV][XVI] et la combinaison de plusieurs indices ont permis de prendre en compte certains aspects du scénario d'éclairage comme la luminance de fond tout en considérant les paramètres des sources potentiellement

éblouissantes (angle solide de vision, intensité), leurs quantités et leurs positions dans le champ visuel.

La formule générale est :

$$UGR = 8 \log \frac{0.25}{L_b} \sum_n \left( L_n^2 \frac{\omega_n}{p_n^2} \right) \quad \text{Équation 55}$$

$L_b$  : la luminance de background, soit la luminance de fond.

$L_n$  : la luminance d'une source n.

$P_n$  : la position de Guth de la source n dans le champ visuel de l'observateur (définit ci-dessous)

$\omega_n$  : l'angle solide sous lequel l'observateur voit la source n.

L'angle solide  $\omega_n$  (Figure 51 ) dépend de la projection de la surface de la zone lumineuse sur la sphère ayant pour centre la position de l'observateur à une distance r qui sépare le centre de la source de l'observateur :

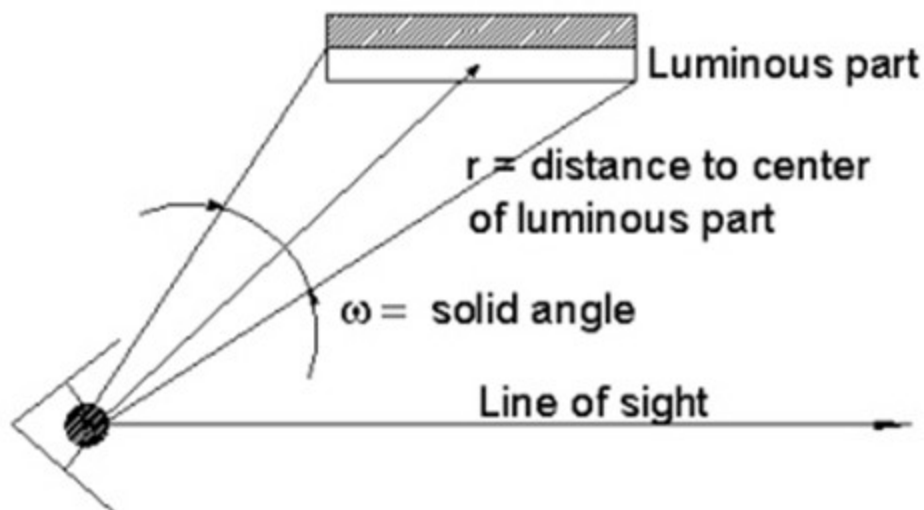


Figure 51 L'angle solide  $\omega_n$

La position de Guth P se définit ainsi (Figure 52 ):

$$P = \exp[(35.2 - 0.31889\alpha - 1.22^{-2\alpha/9}) \times 10^{-3} \beta + (21 + 0.26667\alpha - 0.002963\alpha^2) \times 10^{-5} \beta^2]$$

Équation 56

$\alpha$  : représente l'angle entre la source et le plan vertical par lequel passe la ligne de vue (rad)

$\beta$  : représente l'angle entre la source et la ligne de vue (rad)

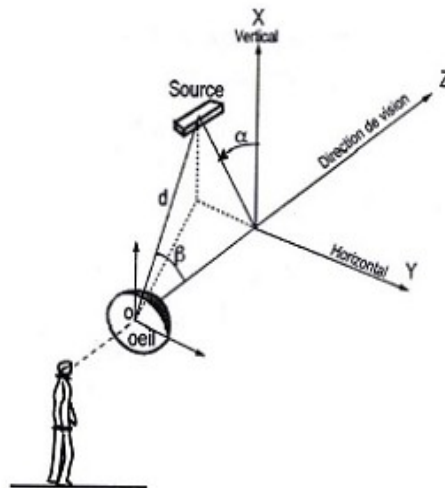


Figure 52 Représentation des angles  $\alpha$  et  $\beta$  utilisés pour le calcul de l'UGR

#### UGR pour les sources de petites tailles

L'indice précédent, l'UGR de la CIE, s'appuie sur un ensemble d'études [XLIII] dont la taille des sources est supérieure à 0.0003 stéradian. Cet angle solide correspond à une applique circulaire de 10 cm de rayon vue à une distance de 10 m ou encore, à une pièce de 10 centimes d'euro placée à une distance d'un mètre. La CIE propose une formule alternative pour calculer l'UGR des sources de petites tailles. D'après ce document, une source de petite taille est définie comme une source ayant une surface projetée inférieure à 0.005m<sup>2</sup> quelle que soit la distance.

Avec l'apparition des sources à DEL, il existe de plus en plus de sources puissantes et de petites tailles sur le marché. Ainsi, par leur nature et leur puissance, ces sources sont éblouissantes : c'est notamment le cas des sources à DEL en "épis de maïs", qui, de par leur construction, laissent apparaître plusieurs petites DEL intenses.

Ainsi, il est important de proposer une solution pour prendre en compte ce type de source.



La formule générale de l'UGR pour les sources de petites tailles reste quasiment inchangée, seul le terme  $L^2\omega/p^2$  est remplacé par  $200 \cdot I^2/(r^2 \cdot p^2)$

Avec :

I : correspond à l'intensité lumineuse de la source,

r : la distance avec la source.

p : la position de Guth.

Note : le terme 200 à l'unité d'une surface: le m<sup>2</sup>.

$$UGR_{petite-sources} = 8 \log \frac{0.25}{L_b} \sum_n \left( \frac{200 I_n^2}{r_n^2 p_n^2} \right) \quad \text{Equation 57}$$

## Troisième partie

### Présentation des expériences subjectives

Dans la partie précédente, nous avons mis en place un certain nombre d'indicateurs pour évaluer les paramètres de la vision humaine. Nous avons pu voir aussi que certains sont controversés et d'autres nécessitent de vérifier leur conditions d'application sur les nouvelles technologies. Enfin, dans certains domaines, tel que le confort visuel général d'un environnement, nous avons mis en avant le manque d'indices permettant l'évaluation du confort visuel d'une manière globale. Pour répondre à cette problématique, nous avons entrepris deux importantes expériences subjectives pour obtenir des données dans les deux domaines suivants : (1) le rendu des couleurs, en nous intéressant à la préférence des utilisateurs et à d'autres critères relatifs à l'apparence colorée des objets (2) et le confort visuel, en nous intéressant notamment aux incertitudes liées aux indices évaluant l'éblouissement, à la variation des températures de couleurs et à des configurations d'environnement plus complexes.

Les paragraphes qui suivent présentent les deux expériences subjectives tout d'abord sur le rendu des couleurs puis sur le confort visuel. Pour chacune de ces expériences, nous exposons le but attendu, les protocoles de test, la description du panel des participants et les technologies utilisées. Nous détaillerons ensuite les différents résultats et mesures physiques obtenus dans ces réalisations.

# Expérience sur le rendu des couleurs

Le but de cette expérience est d'obtenir davantage de données subjectives sur les phénomènes suivants : L'homme est-il un bon juge pour évaluer la couleur d'un objet qu'il connaît ?

Est-il capable d'évaluer l'apparence colorée des objets qui l'entourent et les différences qui s'opèrent lors d'un changement d'éclairage ?

Enfin l'établissement de préférences personnelles selon des critères individuels est-il commun pour une majorité de personne?

Pour cette expérience nous avons utilisé une pièce que nous avons appelé « pièce subjective », dont toutes les sources de lumière sont placées au plafond et sont diffusées de façon identique dans la pièce grâce à un diffuseur. Ainsi l'observateur ne peut pas porter de discriminations sur la distribution de la lumière, l'intensité et les effets d'ombres car ces éléments sont les mêmes pour chaque proposition de solution.

## Description du salon

La pièce subjective est le moyen d'expérimentation qui a nécessité le plus d'attention et le plus de réalisations au cours de mon travail de thèse. En effet, elle est utilisée dans le cadre de deux expériences différentes. En conséquence, elle doit subir quelques modifications pour chacune des expériences.

De manière globale, il s'agit d'une pièce située dans l'enceinte du laboratoire dans un endroit dépourvu de toutes activités bruyantes qui auraient pu introduire un biais. Cette pièce rectangulaire mesure 4 m sur 4.5 m pour une hauteur de plafond de 2.8 m. Sur l'une des longueurs, il y a, dans un coin, une porte standard. Sur l'une des largeurs, on trouve, centrée, une fenêtre à double battants. Le sol est recouvert d'un linoléum imitation bois. Les murs et le plafond sont peints avec une peinture blanc-mat ordinaire. Au centre du plafond se trouve une ouverture carrée de 1.2 m de côté.

Un diffuseur s'y trouve encastré. Il est choisi avec une grande attention : diverses mesures sont effectuées sur des échantillons afin de trouver un diffuseur qui ne déforme pas trop le spectre lumineux, qui diffuse relativement bien, sans pour autant engendrer trop de perte optique.

Au-dessus de cette ouverture, un système à base de profilés d'aluminium permet d'effectuer des changements rapides de sources lumineuses : deux chariots mobiles peuvent être déplacés juste au-dessus du diffuseur et alimentent les sources lumineuses. Lorsque le chariot n'est pas au-dessus du diffuseur, les sources s'y trouvant peuvent être alimentées sans influencer l'environnement à l'intérieur de la pièce ce qui permet de préchauffer ou de maintenir dans un état stable les solutions d'éclairage qui le nécessitent. Un dernier cadre fixe permet d'alimenter des sources qui n'ont pas nécessairement besoin d'un temps de chauffe.

Il est possible d'actionner individuellement chaque procédé à partir d'un panneau électrique se trouvant à l'extérieur de la pièce et de bouger les chariots à travers un système de poulies.

Un descriptif des sources et de leur installation est fait dans une partie ultérieure.

Dans le salon nous trouvons des meubles : un canapé gris avec une jetée de lit blanche et deux coussins bleus, une petite commode en bois teintée en rouge, deux commodes en bois naturel, une table basse en bois, une bibliothèque en bois, un tapis gris, deux chaises en osier avec chacune un coussin rouge.

Au-dessus du diffuseur, une structure en profilé aluminium est réalisée par mes soins. Sur cette structure, nous trouvons un cadre fixe et deux chariots mobiles entraînés par deux câbles distincts.

Le cadre fixe se trouve au-dessus de l'ouverture du diffuseur. Les chariots peuvent se trouver soit au-dessus du diffuseur, soit à l'écart. L'ensemble des solutions d'éclairage est réparti sur ces trois parties, avec, sur les chariots mobiles, des éléments nécessitant un temps de chauffe important. Ainsi, il est possible d'effectuer cette mise en marche lorsque le chariot est à l'écart du diffuseur. Un jeu de panneaux opaques noirs est installé afin de minimiser les intrusions des sources extérieures ou en chauffe. Un ensemble de panneaux blancs diffusants permet d'optimiser le rayonnement issu des sources placées au-dessus du diffuseur.

Le diffuseur est raccordé à la structure en aluminium. Il permet une ouverture rapide et un accès aux résolutions de problèmes notamment pour des opérations de maintenance.

## Les technologies utilisées

Les éclairages présents dans les salons étant généralement des éclairages chauds, nous avons fait le choix d'avoir deux groupes de température de couleurs : un groupe dans les 3000 K, un autre dans les 5000 K. Dans chacun de ces groupes, nous choisissons des sources bien implantées sur le marché ainsi que des sources peu répandues ou nouvelles. Ainsi, nous avons

dans le groupe des températures chaudes : un halogène, un cluster de DEL RGBY, une solution de DEL bleu + phosphore jaune, une solution DEL : DEL bleu + phosphore jaune + DEL rouge et enfin une CFL.

Dans le groupe froid, nous avons une solution à base de tubes fluorescents, un cluster de DEL RGB, une solution de DEL bleu + phosphore jaune, une DEL NUV.

Les clusters de DEL (RGB et RGBY) ne sont, en fait, qu'une seule solution physique, constituée de quatre lots de DEL monochromatiques : rouge, vert, bleu et ambre. Le niveau de chaque DEL est contrôlé pour obtenir le bon niveau lumineux, la colorimétrie souhaitée, la bonne température de couleur ainsi que le métamérisme adéquate. Dans le cas du RGB, les DEL ambre sont éteintes. Cette solution est développée dans le cadre de cette thèse et a notamment nécessité la réalisation d'un circuit de contrôle pour chacune des composantes.

Les DEL NUV sont fournies à titre gracieux par la société « Mitsubishi chemical ». Il s'agit de DEL « nues » à intégrer. Après le dessin d'une carte électronique et du routage des pistes, nous avons fait réaliser les cartes et l'intégration des DEL sur ces dernières par la société « LED Développement ».

Hormis les clusters (RGB et RGBY) et les DEL NUV intégrés pour le LNE, l'ensemble des autres solutions sont des solutions « grand public » qui proviennent de distributeurs classiques. (Achat en boutiques spécialisées / réseaux de distribution pour professionnels et pour particuliers)

## Disposition générale

La matière et la texture des objets ayant souvent une influence sur la vision des couleurs de ces derniers, nous avons essayé de mélanger un maximum de matières et de couleurs tout en restant dans un environnement représentatif de celui d'un habitat.

## Description du protocole d'expérimentation

Nous regroupons un ensemble d'observateurs de type européen qui ne sont pas des professionnels de l'éclairage.

L'accueil des observateurs se déroule du 6 avril 2012 au 27 avril 2012.

Chaque observateur est convié à venir effectuer le test individuellement durant l'un de ces trois créneaux horaires : 10h-12h, 13h-15h, 15h-17h.

Les fruits et légumes ne pouvant être conservés dans un état satisfaisant durant toute cette période et pour maintenir un aspect le plus semblable possible tout au long de l'expérience, certains sont remplacés aux cours du protocole.

### Déroulement :

Après la mise en chauffe des solutions environ deux heures avant le début du test, nous accueillons l'observateur dans la pièce. Les lumières du laboratoire sont alors éteintes et l'observateur passe donc dans un couloir éclairé faiblement par de l'halogène.

La lecture d'un texte explicatif de l'expérience, de son cadre et des éléments à juger est faite au participant. Puis nous passons quatre éclairages différents (tubes froids, solution RGB, CFL, DEL chaude) sans demander de notation. Ce passage permet au panéliste de se fixer une échelle de notation.

Nous demandons à la personne de remplir une fiche de renseignements concernant son âge, sa taille, son genre, etc.

Ensuite, nous vérifions, par un test, sa vision des couleurs. Sous l'éclairage de tubes type luminaire du jour, le classement de 15 échantillons du test « Desaturated Munsell panel tests », présenté ci-dessous (Figure 53 ), est demandé.



Figure 53 Les 15 échantillons du "Desaturated Munsell" à classer dans l'ordre avec l'échantillon d'origine

Puis nous entreprenons la première phase de notation avec le passage des neuf solutions : les cinq éclairages chauds puis les quatre froids. C'est l'observateur qui impose le rythme de passage de chaque éclairage, mais il n'est pas possible de revenir en arrière. Il est libre de se déplacer dans le salon (Figure 54 ).

Une pause de 10 minutes permet à l'observateur de se reposer avant la deuxième phase de notation.



Figure 54 Panéliste effectuant le test

Celle-ci est pratiquement identique à la première car elle ne diffère que dans l'ordre de présentation des sources.

A la fin de la session, nous demandons si le sujet a des remarques particulières ou des observations à faire.

## Le panel

Dans le cadre de cette première expérience, nous faisons appel à des volontaires. 43 se sont présentés âgés de 20 à 62 ans. Au total Il y a 14 femmes et 29 hommes. Tous ont validé le test des échantillons colorés décrit plus haut.

## Les ordres de passage

Chaque panéliste passe deux sessions d'évaluations, comportant à chaque fois la passation du jeu des neuf sources mais dans un ordre différent. Les sources froides et les sources chaudes n'ont pas été mélangées entre elles. J'ai établi six ordres différents pour les sources chaudes, qui sont aussi présentées dans le sens inverse. Il y a quatre ordres pour les sources froides, aussi présentées dans le sens inverse. Ci-dessous (Table 7 ) les ordres de passage :

chaud A	1	halogène	9		
	2	CFL	5		
	3	Toshiba	11		
	4	osram A80	4		
	5	RGBY	1	2	
froid A	6	tubes FL	10		
	7	nuv	3		
	8	RGB	1		
	9	kryona	6		
chaud B	1	RGBY	1	2	
	2	CFL	5		
	3	toshiba	11		
	4	halogène	9		
	5	osram A80	4		
froid B	6	kryona	6		
	7	tubes FL	10		
	8	RGB	1		
	9	nuv	3		
chaud C	1	CFL	5		
	2	osram A80	4		
	3	toshiba	11		
	4	RGBY	1	2	
	5	halogène	9		
chaud D	1	CFL	5		
	2	halogène	9		
	3	Toshiba	11		
	4	osram A80	4		
	5	RGBY	1	2	
froid D	6	RGB	1		
	7	nuv	3		
	8	tubes FL	10		
	9	kryona	6		
chaud E	1	osram A80	4		
	2	halogène	9		
	3	RGBY	1	2	
	4	toshiba	11		
	5	CFL	5		
froid E	6	kryona	6		
	7	tubes FL	10		
	8	nuv	3		
	9	RGB	1		
chaud F	1	CFL	5		
	2	halogène	9		
	3	osram A80	4		
	4	toshiba	11		
	5	RGBY	1	2	



<b>froid</b> <b>C</b>	<b>6</b>	<b>RGB</b>	<b>1</b>		
	<b>7</b>	<b>nuv</b>	<b>3</b>		
	<b>8</b>	<b>kryona</b>	<b>6</b>		
	<b>9</b>	<b>tubes FL</b>	<b>10</b>		
<b>froid</b> <b>F</b>	<b>6</b>	<b>RGB</b>	<b>1</b>		
	<b>7</b>	<b>nuv</b>	<b>3</b>		
	<b>8</b>	<b>kryona</b>	<b>6</b>		
	<b>9</b>	<b>tubes FL</b>	<b>10</b>		

Table 7 Les six ordres utilisés

Les précautions décrites ci-dessus, permettent d'éviter tout biais introduit par une suite unique. En effet, l'œil humain s'adaptant, une part de l'évaluation dépend, en partie, de la source précédente. Une source de qualité moyenne présentée juste après une source médiocre sera plus appréciée que si elle est présentée après une source de bonne qualité. De plus, comme la deuxième évaluation est dans un autre ordre, elle permet d'identifier à quel point un individu est capable de juger, dans l'absolu, les sources qui lui sont présentées.

## Présentation des mesures physiques

Dans cette partie, nous présentons les différentes mesures effectuées dans le cadre de l'expérience sur la couleur. Un des points clef de cette expérience est de maintenir un niveau constant de paramètres optiques, autant pendant une session que dans les différentes passations entre tous les observateurs. Nous avons effectué de nombreuses mesures pour caractériser au mieux les évolutions de ces paramètres à l'aide notamment de deux spectro-radiomètres et d'un petit luminancemètre. La totalité des mesures n'est pas présentées ici car elles ne présentent pas toutes un intérêt.

Néanmoins nous retrouverons : les mesures de transmission et du choix du diffuseur central, l'évolution du spectre et de la luminance en fonction du temps de chauffe et les variations des spectres et de la luminance dans le temps, ainsi que l'impact de celles ci sur les métriques de rendu des couleurs. Un comparatif entre les différents moyens de mesure est effectué.

L'ensemble des mesures présentées correspond aux mesures effectuées et corrigées par les facteurs d'étalonnages propres aux appareils utilisés pour l'acquisition de ces dernières.

## Spectres optiques des sources et évolutions des paramètres.

### Etude des variations du spectre dans le temps

Nous nous intéressons ici aux variations relatives du spectre qui peuvent avoir une influence sur le rendu des couleurs : tant que le rapport entre les longueurs d'onde n'évolue pas, seul le

niveau lumineux global de l'environnement change. En conséquence, les spectres présentés sont normalisés à l'unité (Figure 55 à la Figure 63 ).

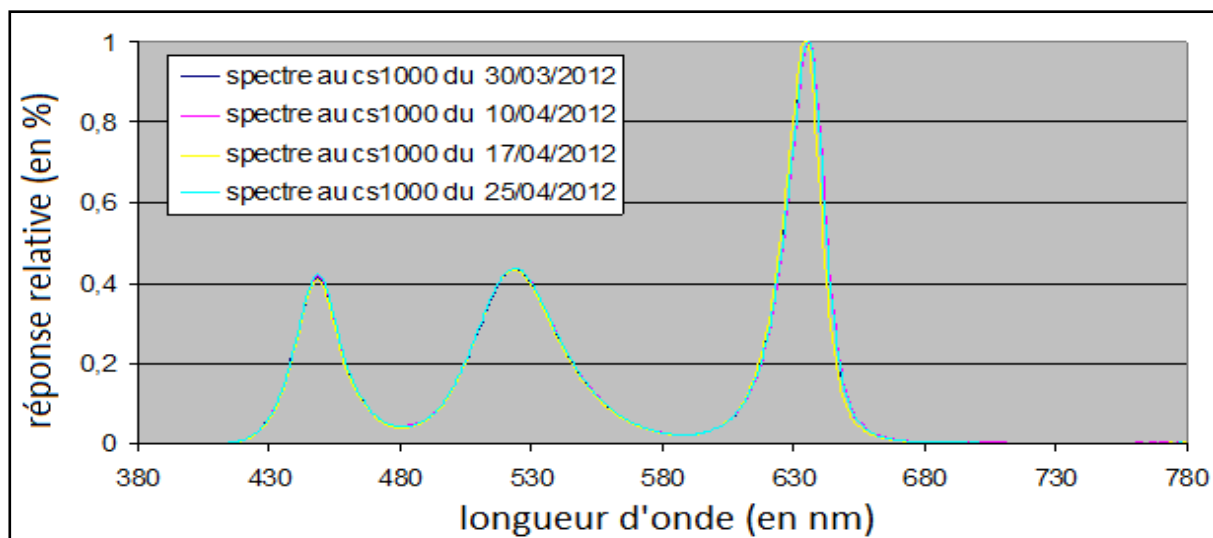


Figure 55 Répartition spectrale du RGB

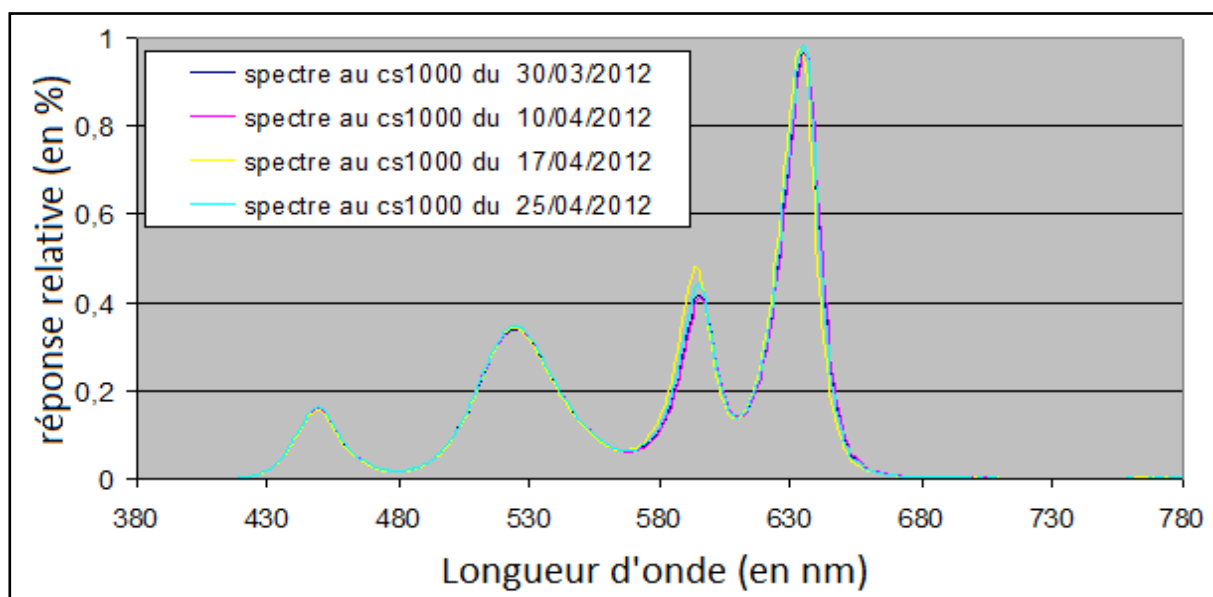


Figure 56 Répartition spectrale du RGBY

Nous pouvons observer quelques variations sur le pic rouge et sur le pic orange. Remarquons l'impact de ces fluctuations dans le tableau suivant.

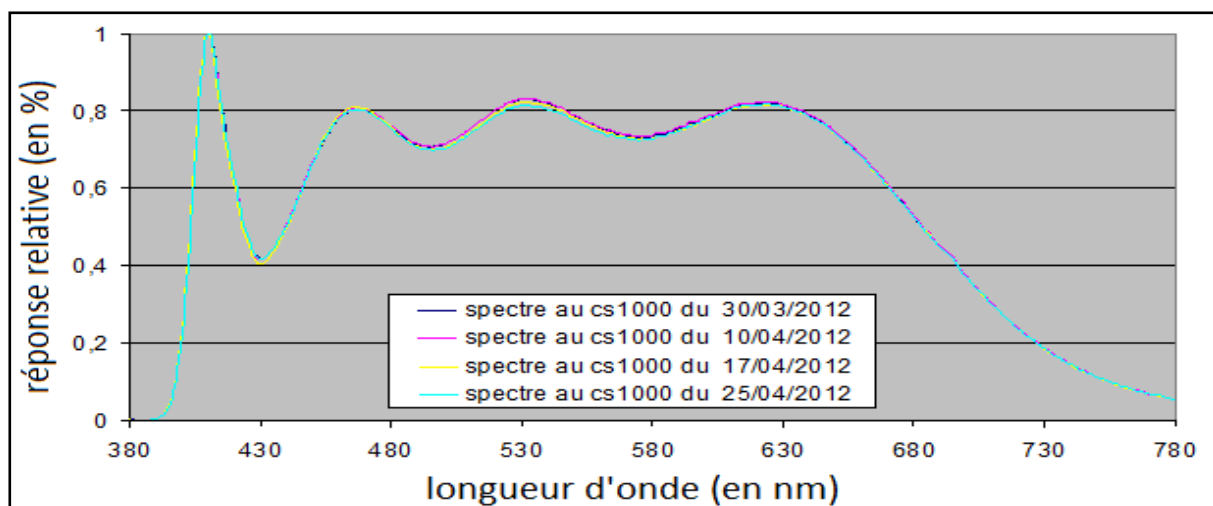


Figure 57 Répartition spectrale du NUV

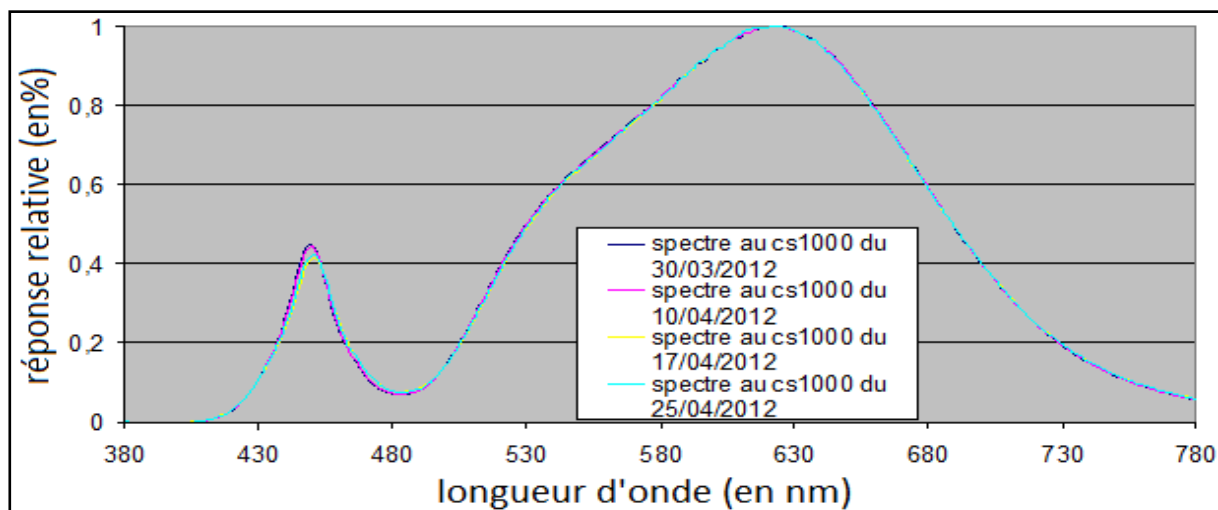


Figure 58 Répartition spectrale de la solution à DEL WW (warm white) utilisant les sources de manufacture Toshiba

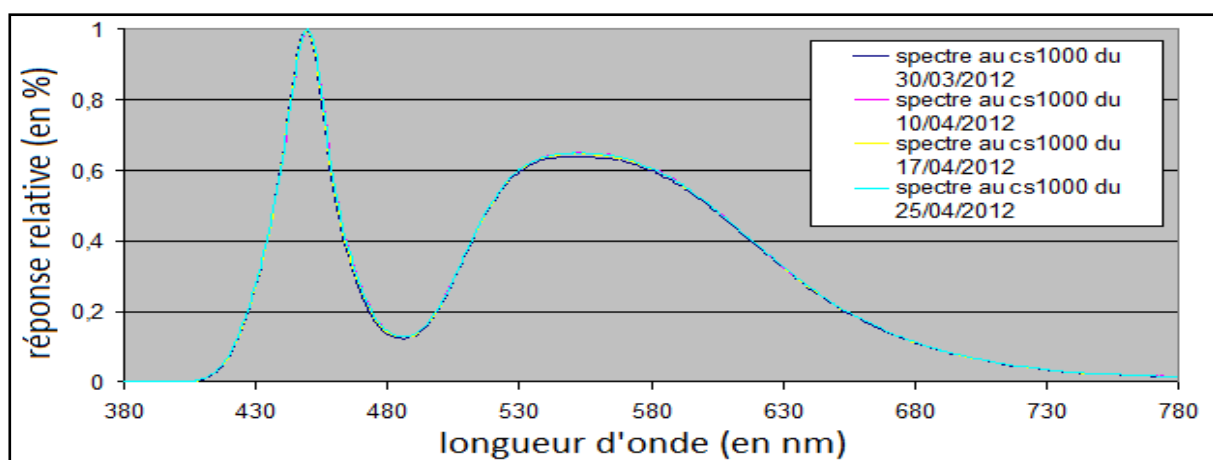


Figure 59 Répartition spectrale de la solution à DEL CW (cold white) utilisant les sources de manufacture Kryona

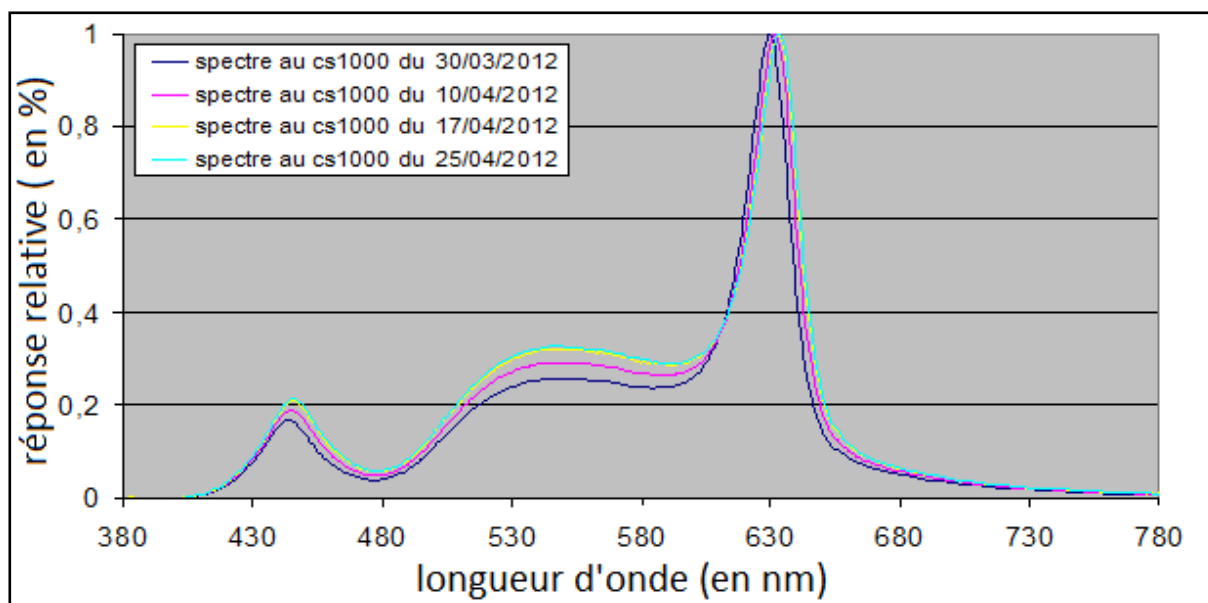


Figure 60 Répartition spectrale de la solution à DEL WR (warm red) utilisant les sources de manufacture Osram

Sur la courbe ci-dessus (Figure 60 ), on peut voir quelques évolutions, surtout lors des premières mesures. En effets les courbes du 17/04 et du 25 se confondent. Nous pouvons remarquer aussi que la principale évolution se fait dans le rapport entre le pic rouge et les autres longueurs d'ondes. Il est alors possible de prédire une variation des caractéristiques colorimétriques de cette source, notamment sa température de couleur associée

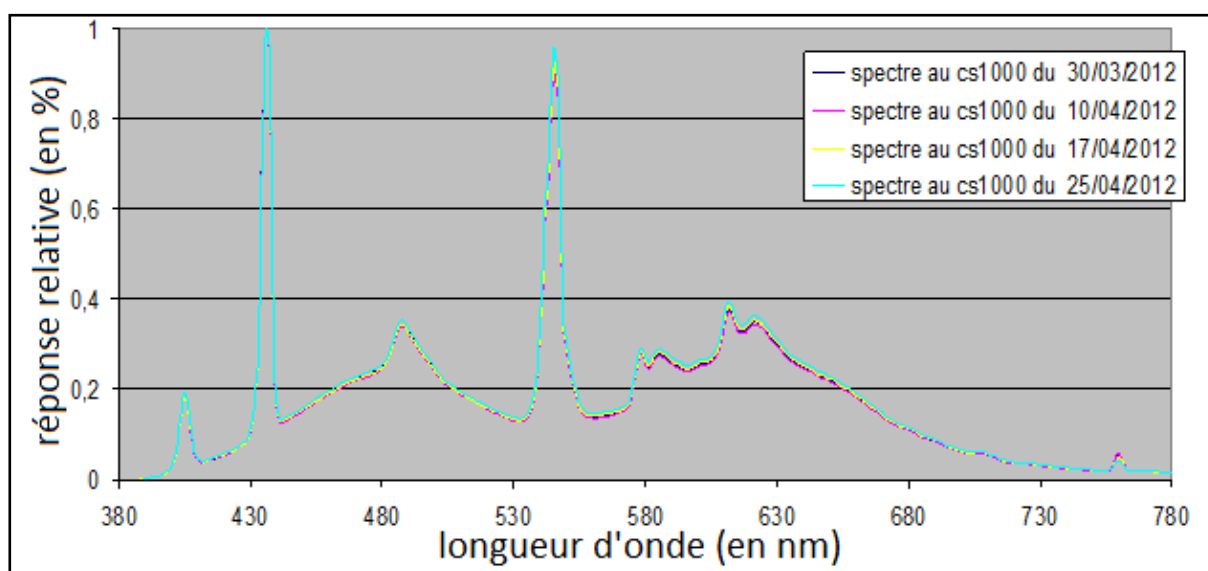


Figure 61 Répartition spectrale de la solution à tubes fluorescents froids

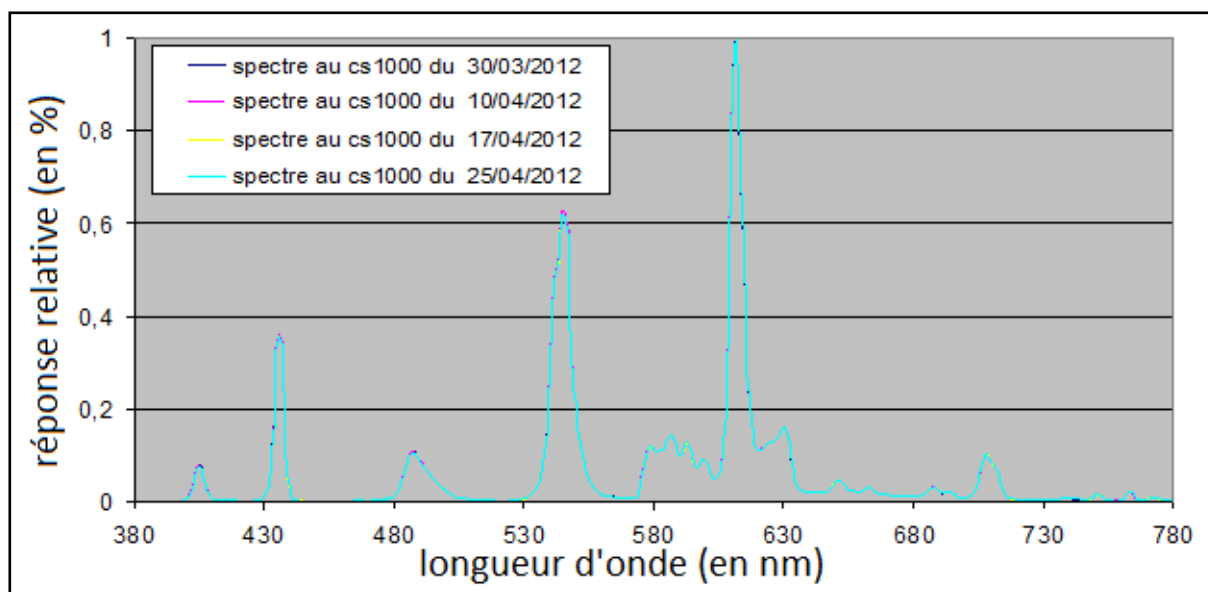


Figure 62 Répartition spectrale de la solution fluorescente chaude

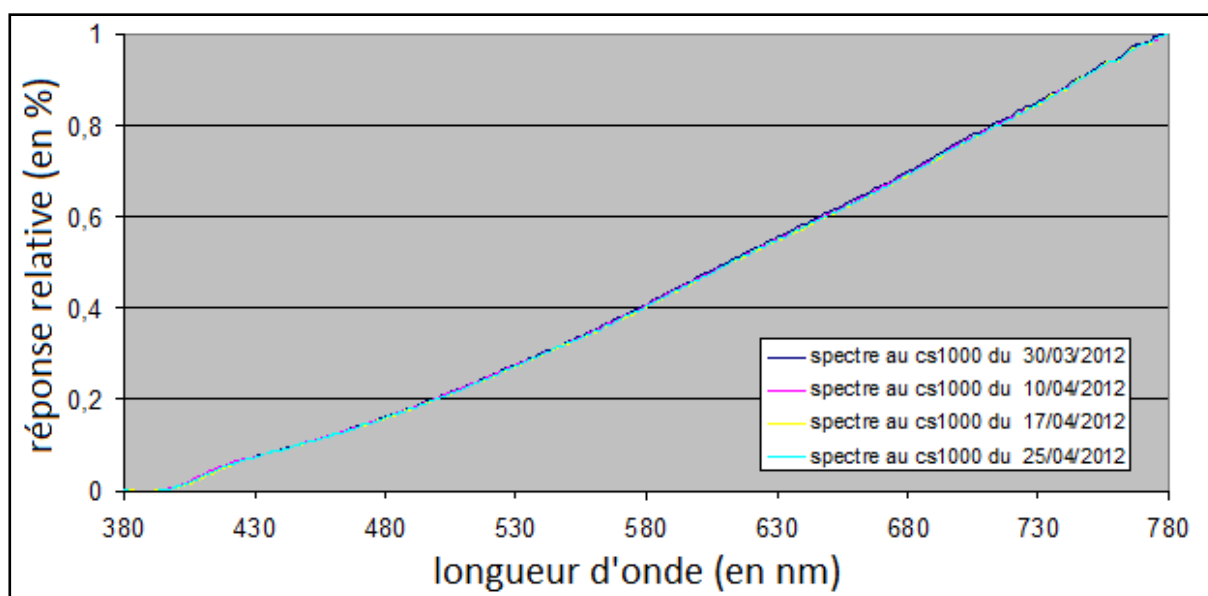


Figure 63 Répartition spectrale de la solution halogène

## Variations des résultats des métriques et des températures de couleur

Sources:		Ra	CQS	MCRI	CCT (en K)
RGB	En date du 30/03	36.5	63.3	94.8	5447
	En date du 10/04	37.2	63.4	94.7	5512
	En date du 17/04	35.8	63.0	94.6	5336
	En date du 25/04	37.0	63.4	94.8	5520
	moyenne	36.5	63.2	94.7	5435
RGBY	En date du 30/03	69.9	77.0	90.7	2866
	En date du 10/04	69.0	76.7	90.8	2890
	En date du 17/04	76.3	78.9	90.0	2788
	En date du 25/04	71.5	77.6	90.6	2854
	moyenne	71.4	77.4	90.5	2851
NUV	En date du 30/03	98.3	99.0	90.7	5056
	En date du 10/04	98.2	99.1	90.7	5053
	En date du 17/04	98.1	99.1	90.8	5056
	En date du 25/04	97.8	99.1	91.0	5043
	moyenne	98.2	99.1	90.7	5047
DEL WR (Osram A80)	En date du 30/03	87.1	86.3	90.9	2591
	En date du 10/04	88.1	88.8	91.2	2774
	En date du 17/04	88.6	90.3	91.2	2913
	En date du 25/04	88.7	90.6	91.2	2942
	moyenne	88.0	88.4	91.0	2761
CFL	En date du 30/03	81.9	75.8	77.9	2731
	En date du 10/04	81.9	75.7	77.9	2722
	En date du 17/04	82.0	75.7	78.0	2711
	En date du 25/04	82.0	75.7	78.0	2711
	moyenne	81.9	75.7	77.8	2723
DEL CW (Kryona)	En date du 30/03	70.5	71.3	75.6	5511
	En date du 10/04	70.8	71.4	75.9	5534
	En date du 17/04	70.7	71.4	75.8	5516
	En date du 25/04	70.8	71.4	75.9	5529
	moyenne	70.6	71.4	75.7	5513
Halogène	En date du 30/03	99.7	96.7	89.4	2751
	En date du 10/04	99.8	96.9	89.4	2753
	En date du 17/04	99.7	96.7	89.4	2745

	En date du 25/04	99.7	96.8	89.4	2748
	moyenne	99.7	96.7	89.4	2750
<b>Tubes Fluorescents</b>	En date du 30/03	93.5	96.5	92.4	4823
	En date du 10/04	93.4	96.5	92.4	4829
	En date du 17/04	93.7	96.5	92.4	4778
	En date du 25/04	94.0	96.5	92.3	4755
	moyenne	93.7	96.5	92.3	4795
<b>DEL WW (Toshiba)</b>	En date du 30/03	82.6	79.2	85.1	2648
	En date du 10/04	82.6	79.2	85.1	2644
	En date du 17/04	82.8	79.4	85.2	2629
	En date du 25/04	82.8	79.3	85.2	2635
	moyenne	82.7	79.3	85.1	2641

Table 8 Résultats des métriques de toutes les sources utilisées dans le temps ainsi que la température de couleur. *Note: la moyenne prend en compte d'autres mesures*

Hormis le cas du RGBY (Table 8 ), les solutions ont toutes des variations relativement faibles ne dépassant pas  $\pm 1$  unité.

Nous voyons l'impact des évolutions présentées sur la solution A80 (WWR). En effet, il y a des fortes variations sur la température de couleur. On notera cependant que ces variations n'ont pas une incidence importante sur le résultat des métriques de rendu des couleurs présenté ici.

## Niveau lumineux

Le niveau de l'intensité lumineuse est un paramètre important. En effet, il faut se placer dans un environnement ni trop sombre ni trop lumineux. De plus, certaines études ont montré que, pour un même environnement, le niveau lumineux doit être augmenté avec la température de couleur de la solution montée. Avec les outils dont nous disposons lors de cette expérience, il nous est possible d'acquérir une valeur venant d'une certaine direction.

### Etude des variations de la luminance dans le temps

Le tableau ci-dessous (Table 9 ) montre les mesures des niveaux établies à l'aide du CS 1000.

Date	30/03/2012	10/04/2012	17/04/2012	25/04/2012
RGBY	114	112,1	119,4	114,8
Toshiba	105	113,1	102,4	105,6

A80 Osram	114	108,8	101,6	101,2
CFL	107	113,8	108,9	109,8
halogène	112	114,1	111	111,1
RGB	103	102,9	103,7	102,5
Kryona	115	116,4	113,9	115,5
NUV	113	111,4	108,3	108,9
Tubes FL	115	112,1	111,4	115,6

Table 9 Variation des niveaux lumineux (cd/m<sup>2</sup>) dans le temps

Il est à noter que l'expérience sur le rendu des couleurs a débuté le 6 avril mais seul 3 participants ont passé le test avant le 10/04 (7-8-9 avril 2012 étant chômeurs). La différence entre le 30 mars et le 10 avril correspond donc à l'étape préliminaire de vieillissement des solutions afin d'éliminer toute solution porteuse d'un défaut de fabrication. La valeur en date du 30/03 n'entre pas en compte sur les fluctuations durant l'expérience. Si ces valeurs sont présentées ici, c'est à titre indicatif car certaines solutions à DEL sont parfois assujetties à une forte variation de leurs niveaux lumineux ou à leurs caractéristiques colorimétriques en début de vie car les couches de phosphore s'optimisent et se déforment sous l'effet de la chaleur.

Dans l'ensemble, nous constatons que certaines solutions comme l'halogène ou le cluster RGB sont plus stables alors que d'autres, comme les A80, le sont moins.

## Présentation des résultats

### Présentation

Dans le cadre de ce test, les observateurs avaient à évaluer neuf composantes des caractéristiques de l'apparence des couleurs, qui se trouve dans l'annexe 3.

La première représente leur préférence globale : l'observateur formule un jugement propre à son ressenti et selon ses critères personnels.

Concernant la fidélité des couleurs, l'observateur indique si les couleurs des objets présents dans la pièce ont la couleur attendue, et si cette dernière est fidèle à la représentation qu'il se fait de la couleur de cet objet.

En ce qui concerne le paramètre relatif à la qualité de la vivacité des couleurs, certains éclairages ont tendance à produire une saturation plus soutenue, qui peut être soit appréciée soit dépréciée. La question est donc d'évaluer la qualité et non la quantité de la couleur.



Ensuite, nous demandons d'évaluer le côté naturel des couleurs, une première fois de façon globale, puis sur des éléments particuliers : les fruits et légumes (Figure 64 ), la peau et les plantes.

Pour finir, l'observateur évalue le rendu d'une charte des couleurs.

Pour insister sur les nuances entre le naturel, la fidélité et la vivacité des couleurs, nous proposons des oppositions (Table 10 ) :

naturel	artificiel
fidélité	couleur faussée (erronée)
vivacité	pas de couleur (platitude, terne)

Table 10 Opposition des paramètres à évaluer

Pour faire comprendre et illustrer la manière de nuancer, nous proposons des exemples :

- Certains éclairages peuvent rougir un peu la peau, et celle-ci paraît un peu plus halée, tout en restant sur une teinte naturelle de peau. Mais ce changement est une couleur faussée par rapport à la couleur réelle de la peau de l'individu considéré.
- Dans l'inconscient collectif, le beurre a une couleur bien jaune. D'ailleurs certains producteurs rajoutent du carotène pour jaunir leur beurre. Un beurre bien jaune pourra nous paraître fidèle à l'image que l'on s'en fait, mais ne sera pas propre à la véritable couleur naturelle du beurre.

Pour l'ensemble de ces paramètres, la notation s'effectue sur une échelle de cinq valeurs. La note 1 est assimilée à une caractéristique « très insuffisante », 2 pour « insuffisante », 3 « moyenne », 4 « bonne » et 5 « très bonne ».

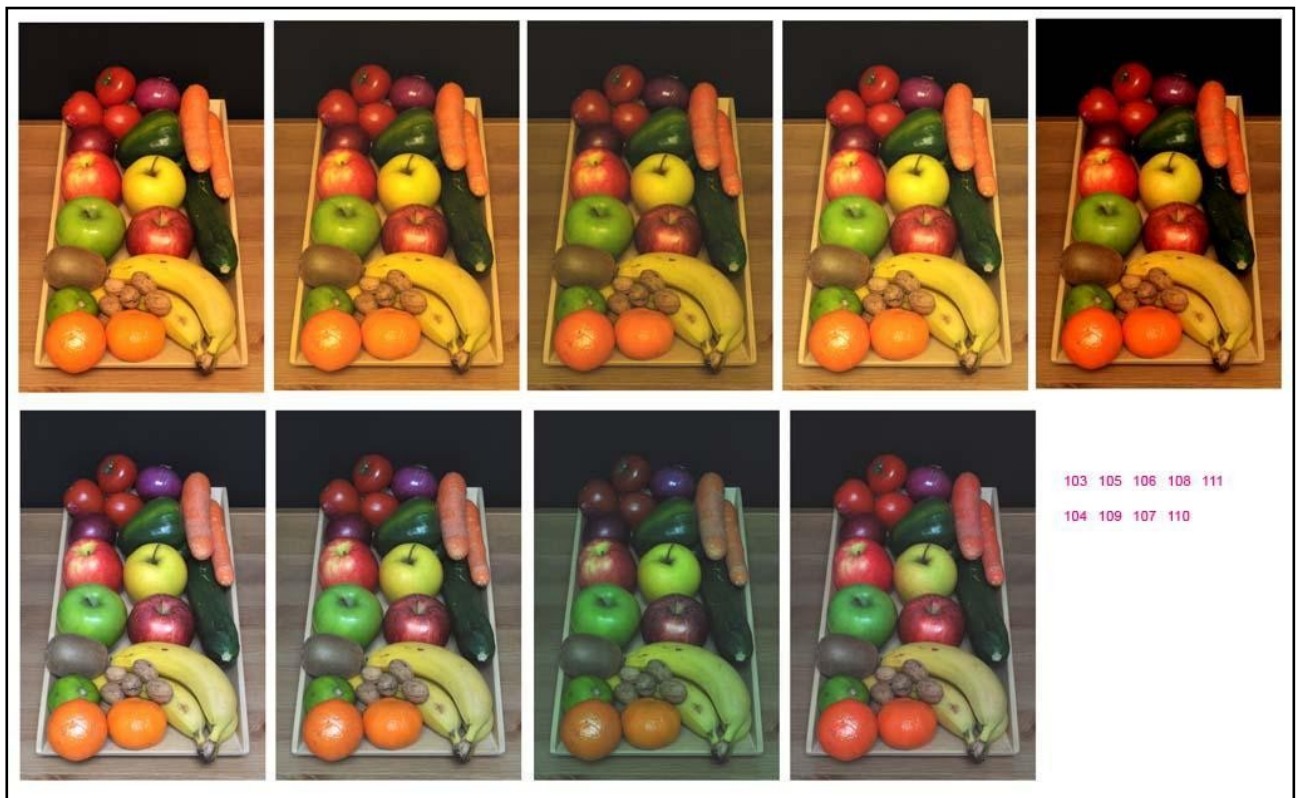


Figure 64 Photos de la corbeille des fruits et légumes sous les différents éclairages

### Exploitation :

#### Moyenne des résultats :

Dans la figure (Figure 65 ) ci après, nous présentons la moyenne des résultats obtenus selon les attributs de qualité. Pour mieux visualiser le taux global par rapport à la CCT, nous avons séparé par groupe de températures de couleur : Les ambiances froides apparaissent sur la gauche et les ambiances chaudes sur la droite. Dans l'ensemble les attributions de la préférence globale, de la fidélité des couleurs et du naturel des couleurs suivent des courbes proches, seul le critère de la vivacité des couleurs se différencie.

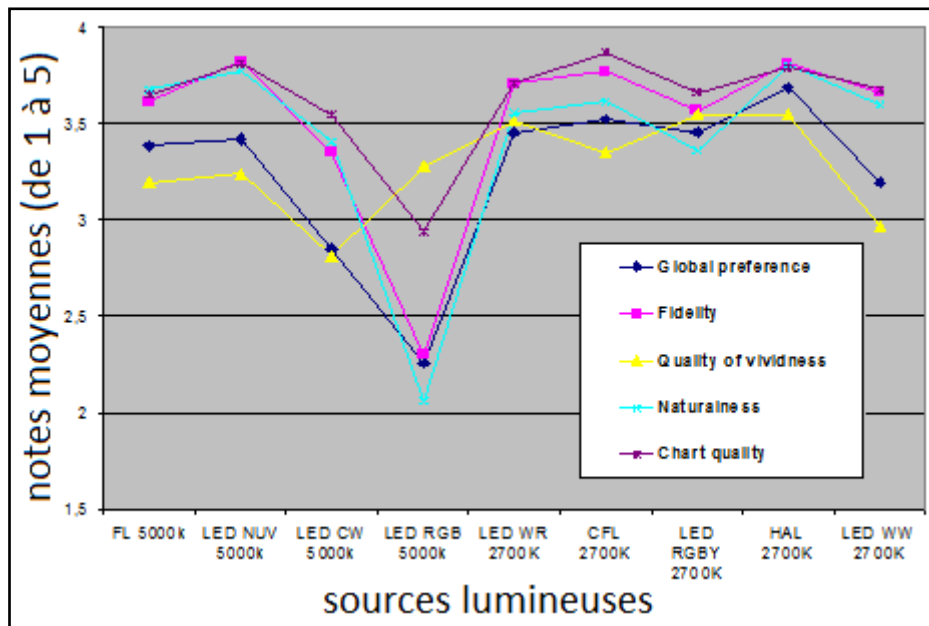


Figure 65 Moyenne des notes subjectives

Le score des préférences subjectives montre un comportement assez homogène dans le premier groupe de panelistes (N°1 à 22). Pour le second groupe (N° 23 à 43) un très petit nombre affiche une différence dans les couleurs chaudes (Figure 66 ). Les numéros de panelistes correspondent à l'ordre de passage. La moyenne des préférences subjectives sur les 43 panelistes montre le même comportement dans la première et dans la seconde séquence (Figure 67 ) avec de petites différences entre les sources chaudes et pour quelques uns entre les sources chaudes rapprochées. Pour cette expérience subjective, à l'exclusion du RGB, nous obtenons des écarts-types sur les critères subjectifs : entre 0.60 et 0.98 avec des valeurs principales variant de 1.8 à 3.9. Etant donné que de nombreux critères sont susceptibles de modifier le jugement de l'observateur dans un salon et compte tenu que les préférences peuvent varier d'un individu à l'autre, nous ne pouvons pas comparer avec d'autres expériences subjectives en termes de variabilité. Des développements statistiques sont effectués pour mieux analyser la signification des résultats subjectifs principaux.

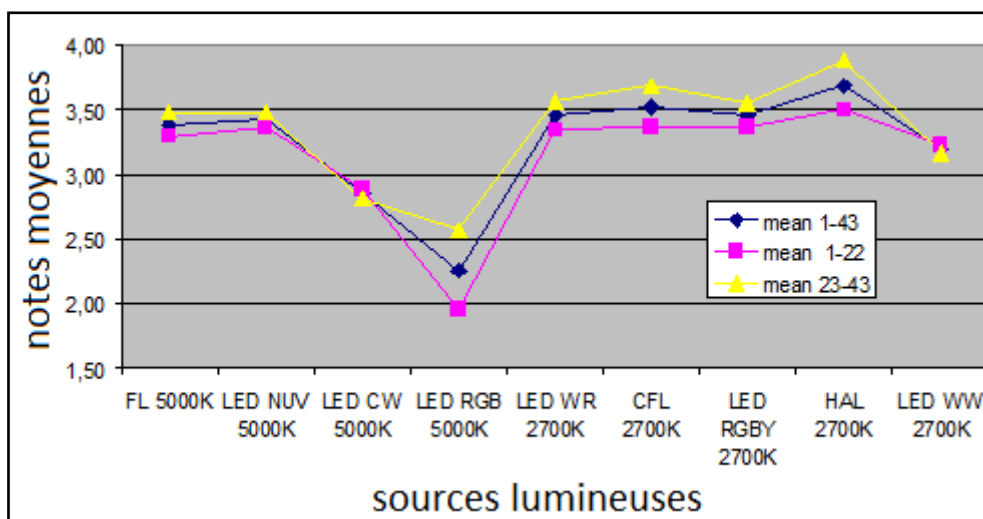


Figure 66 Différence pour le paramètre "préférence" pour le premier groupe et le deuxième groupe

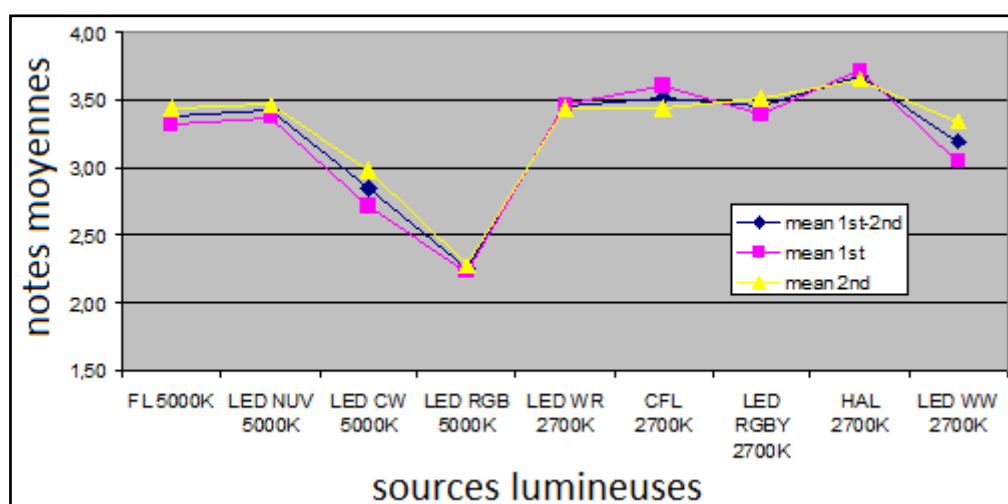


Figure 67 Différence du paramètre "préférence" entre le premier passage et le deuxième

### Analyse en composante principale

Pour cette analyse, j'ai utilisé un programme appelé StatAdvisor. Ce programme teste les différences significatives entre deux échantillons de données collectées comme des paires. Il calcule des statistiques et affiche des graphiques concernant les différences entre les paires de données. Il calcule également divers tests permettant de déterminer si la différence entre les moyennes est égale à 0. Sur la Figure 68 nous remarquons que la densité suit une loi normale.

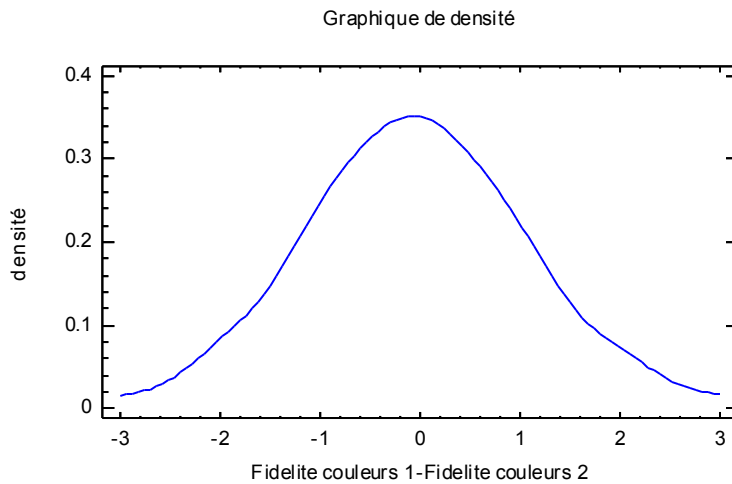


Figure 68 Densité pour le paramètre de la fidélité des couleurs

Les analyses statistiques (Figure 69 )- (PCA pour Principal Components Analysis)- des notes subjectives ont été réalisées à l'aide du logiciel "STATISTICA 6.0". Les saisies établissent le score des huit critères (variables) pour les neuf sources de lumière par rapport aux 43 individus. Ainsi chaque variable est représentée par 387 notes. Pour chaque personne, chaque note est la moyenne des deux séquences par source.

Les principaux résultats de l'analyse en composantes principales apparaissent Figure 69 . Le premier élément indique que 66% des variables varient dans le même sens.

#### Variables (critères subjectifs)

- 1- Préférence générale
- 2- Fidélité des couleurs
- 3- Qualité de la vivacité des couleurs
- 4- Rendu du naturel en général
- 5- Rendu du naturel des plantes
- 6- Rendu du naturel des fruits et légumes
- 7- Rendu du naturel des teintes chair
- 8- Rendu des couleurs par rapport à la charte des couleurs

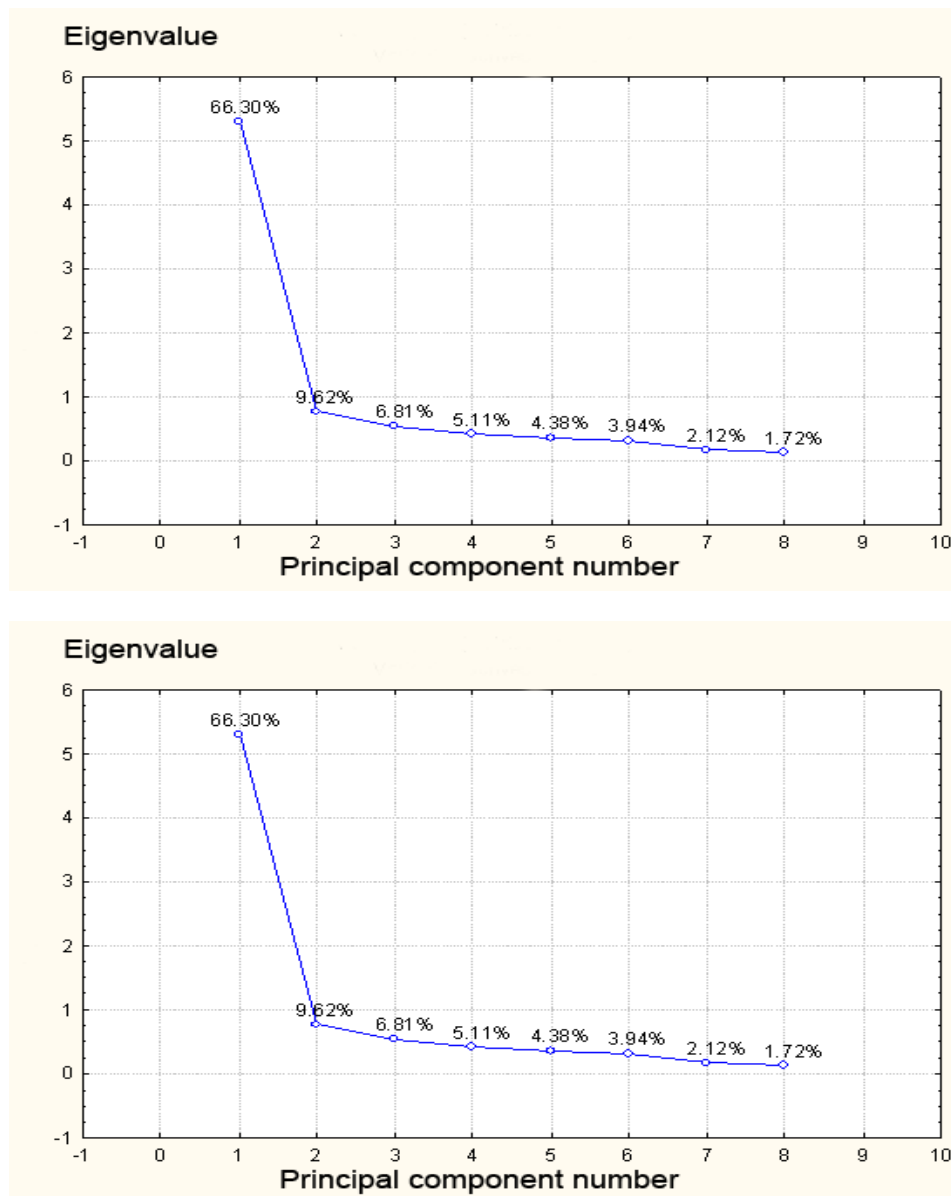


Figure 69 Variabilité donnée par le test PCA de toutes les sources

Cette analyse a été reprise sans la source de lumière RGB 5000K qui donne de plus petits scores avec une plus grande dispersion. Elle est la plus atypique car, avec des températures de couleurs élevées, elle a une forte saturation chromatique notamment dans le domaine du rouge, qui est une couleur chaude. Les résultats sont un peu différents mais ne changent pas l'allure principale des courbes. La corrélation de la vivacité des couleurs est plus grande et celle des autres critères est légèrement plus petite. Le tableau de corrélation (Table 11 ) indique que tous les critères varient dans les valeurs principales et dans la même direction. Les corrélations les plus grandes sont obtenues entre « le rendu du naturel général » et les critères suivants : la fidélité des couleurs, le rendu du naturel des fruits et légumes et le rendu du naturel des plantes. Pour les sources de températures de couleurs chaudes, il y a une forte

saturation chromatique notamment dans le domaine du rouge. Les résultats sont un peu différents mais ne changent pas l'allure principale des courbes.

variable	préférence globale	fidélité des couleurs	qualité de la vivacité	naturel des couleurs	naturel des plantes	naturel des fruits/légumes	naturel de la couleur de peau	qualité de la carte des couleurs
préférence globale	1,00000	0,71041	0,54934	0,70728	0,63650	0,61846	0,57321	0,54586
fidélité des couleurs	0,71041	1,00000	0,47767	0,83073	0,81088	0,68825	0,63577	0,60878
qualité de la vivacité	0,54938	0,47767	1,00000	0,44224	0,35654	0,40689	0,42684	0,39550
naturel des couleurs	0,70728	0,83073	0,44224	1,00000	0,85041	0,75473	0,64740	0,58249
naturel des plantes	0,63650	0,81088	0,35665	0,85040	1,00000	0,71736	0,66019	0,56121
naturel des fruits/légumes	0,61847	0,68825	0,40689	0,75473	0,71736	1,00000	0,60745	0,57146
naturel de la couleur de peau	0,57321	0,63000	0,42684	0,64740	0,66019	0,60745	1,00000	0,58805
qualité de la carte des couleurs	0,54585	0,60878	0,39550	0,58249	0,56121	0,57146	0,58805	1,00000

Table 11 Corrélation des attributs subjectifs

### Autres analyses statistiques

La spécificité de la procédure de test est d'avoir eu deux séquences de passage.

Nous analysons les répartitions de la différence entre toutes les paires de notes possibles (premier et deuxième passage) pour tous les critères et pour toutes les sources lumineuses. Il n'y a pas de différence statistique significative entre la première séquence et la seconde concernant chacun des critères à l'exception de celui « qualité de la vivacité des couleurs ». Ceci tend à confirmer la congruence entre les deux passages. Un observateur semble porter un jugement identique et reproductible sur les paramètres évalués. Nous avons utilisé le test Wilcoxon certifié pour un niveau de fidélité à 95%.

## Expérience subjective sur le confort visuel :

Le but de cette expérience est d'étudier différents aspects de l'éclairage et d'en déduire des règles permettant de prédire si une scène est confortable visuellement ou pas.

Pour cette expérience, nous utilisons les quatre environnements de test, que nous avons nommé, la pièce subjective, le bureau subjectif, les compartiments et l'expérience d'éblouissement.

### Description des quatre configurations

Lors de cette expérience, les panelistes se rendent sur quatre installations qui permettent d'évaluer différents aspects du confort visuel tel que l'éblouissement ou la température de couleurs.

Les expériences sont les suivantes :

- deux expériences dans des environnements complexes :

- l'une dans un environnement familial type salon, où nous réutilisons la pièce subjective décrite dans l'expérience sur le rendu des couleurs mais avec quelques modifications.

- l'autre dans un environnement de travail, type bureau d'entreprise.

- deux autres expériences se trouvent dans des environnements plus réduits et ciblent individuellement les aspects de la température de couleur et de l'éblouissement.

### Expérience d'éblouissement :

L'expérience d'éblouissement est réalisée dans le cadre des expériences sur le confort visuel. Cette expérience se déroule dans un laboratoire où nous avons aménagé un espace dédié à l'expérience. Il se compose ainsi : au fond, un grand panneau gris de 2,7 par 3mètres. Au centre un cadre tenu par deux fils discrets. Au-dessus un rail télescopique permet de positionner une source d'éclairage à une distance et à une hauteur réglable. De l'autre côté de ce dispositif, à environ deux mètres, se trouve une boîte ouverte des deux côtés où les panelistes viennent positionner leur tête. Sur le côté extérieur de la boîte se trouve un repose-menton qui permet de positionner la tête de l'observateur au même endroit. Un siège à la position de l'observateur se trouve placé derrière. De chaque côté de l'observateur se trouve un ensemble d'écrans noirs côté observateur / blancs côté panneaux gris et un ensemble de



lampes dirigé vers la face blanche de ces écrans pour produire une lumière la plus diffuse possible.

Les schémas (Figure 70 et Figure 71 ) ci dessous décrivent l'environnement. Le premier symbolise une vue de coupe dans la longueur, le deuxième une vue de dessus.

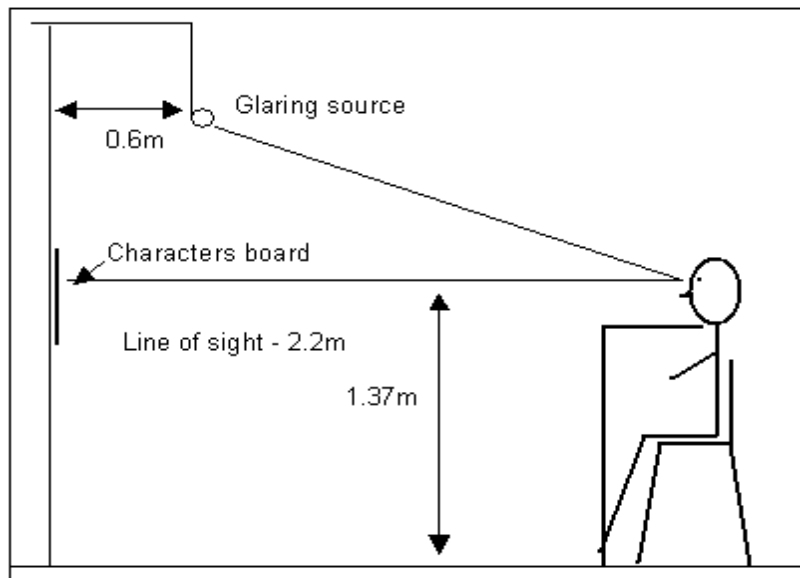


Figure 70 Vue schématique de coté du dispositif permettant d'évaluer l'éblouissement

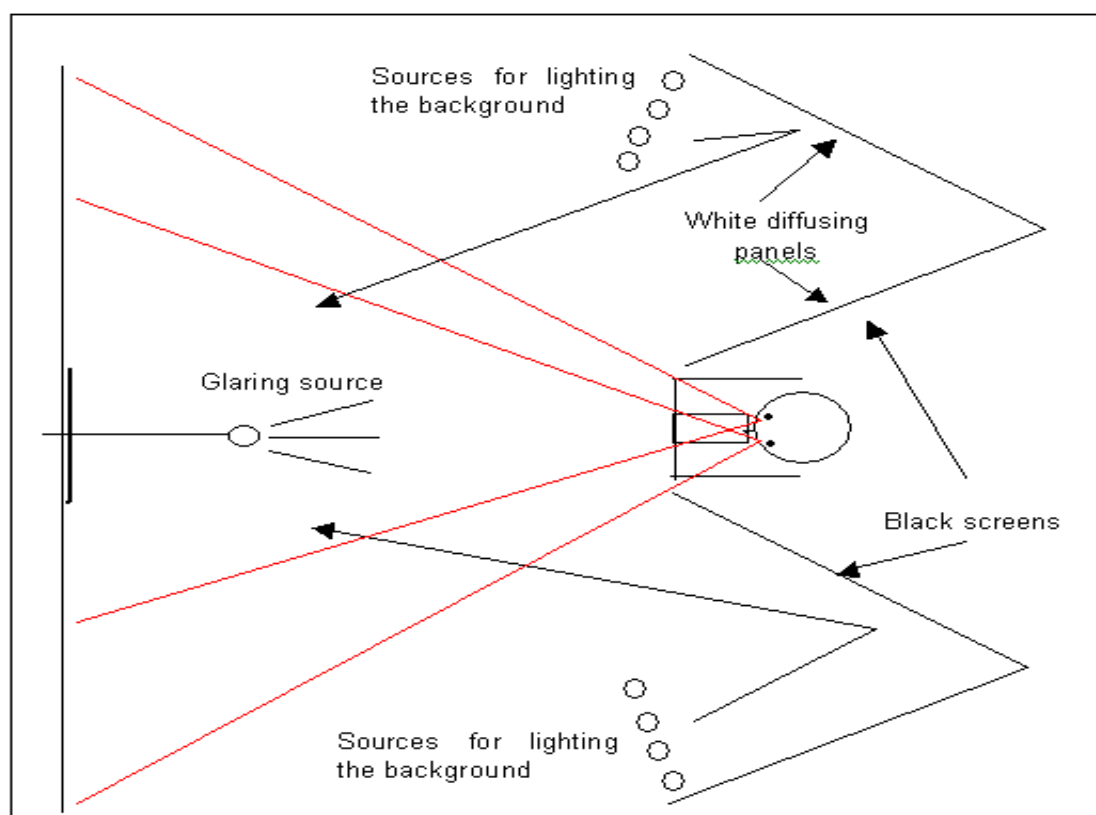


Figure 71 Vue schématique de dessus du dispositif permettant d'évaluer l'éblouissement

Les photos ci-dessous (Figure 72 ) représentent la configuration de l'expérience sur l'éblouissement. Celle de gauche a été prise en retrait de la position du paneliste, dans la direction d'observation. On remarque au premier plan, le siège, puis en montant, le support pour positionner sa tête, ensuite le cadre central, enfin, la source éblouissante. Sur les cotés, la face noire des panneaux diffusants.

La photo de droite a été prise dans le coin gauche du panneau gris dans la direction de l'observateur. On peut voir les faces blanches des panneaux diffusants, avec les sources halogènes qui les éclairent. Entre les deux panneaux se trouve, en retrait, le repose-menton de l'observateur. A gauche on devine la source éblouissante.



Figure 72            Photos de l'installation permettant d'évaluer l'éblouissement (gauche : prise derrière la position de l'observateur, droite: prise du coin gauche du panneau diffusant vers l'observateur)

## Pièce subjective

La pièce subjective est réutilisée dans l'expérience sur le confort visuel mais avec quelques petites modifications. Premièrement, certains objets sont déplacés ou ajoutés –on peut citer l'ajout d'un ensemble de 3 petits cadres (bleu-vert-rose). D'autre part, la façon d'utiliser cette pièce diffère de celle sur l'expérience du rendu des couleurs. En effet, durant l'expérience sur le rendu des couleurs, le but est d'avoir une distribution identique de la lumière. Ici l'utilisation d'appliques murales est nécessaire pour effectuer des distributions de lumière différentes. Cela permet d'avoir certaines sources apparentes. Ces configurations (Figure 73 à la Figure 76 ) utilisent à la fois des sources murales et des sources situées dans le plafonnier central.

Lors de chaque présentation d'éclairage, il est demandé aux observateurs de s'asseoir pendant un temps donné à un endroit précis (position 1) puis de changer de place (position 2) pour une durée identique.

Le choix des technologies d'éclairage est plus limité dans cette expérience. Il se compose de :

- Halogène: 6 spots halogènes montés avec un abat-jour diffusant sur les luminaires muraux et lampes halogènes dans le diffuseur central.
- DEL spot: 12 spots à DEL dans les luminaires muraux.
- DEL diffuse n°1: 12 lampes à DEL diffuse dans les luminaires muraux et 3 lampes à DEL dans le diffuseur central.
- DEL diffuse n°2: 12 lampes à DEL diffuse recouvert d'abat-jour diffusant dans les luminaires muraux.



Figure 73 Configuration halogène (gauche: position 1; droite : position 2)



Figure 74 Configuration de spots à DEL (gauche: position 1; droite : position 2)



Figure 75 Configuration à DEL diffuse n°1 (gauche: position 1; droite : position 2)



Figure 76 Configuration à DEL diffuse n°2 (gauche: position 1; droite : position 2)

### Compartiments :

La configuration en compartiments (Figure 77 ) est réalisée dans le cadre des expériences sur le confort visuel. Cette expérience se déroule dans une grande salle (de  $\sim 5 \times 8$  m). Les murs sont recouverts de plaques ayant une réverbération acoustique contrôlée. Le sol est en dalle de moquette de couleur bleu-gris. Dans chaque coin de la salle sont organisés quatre compartiments composés d'un fauteuil bleu, d'une table avec une lampe et d'une cloison en panneau en bois blanc disposant de trois trous par lesquels des lampes éclairent la scène à travers un diffuseur. Sur les tables est disposé un ensemble de brochures et de photos.

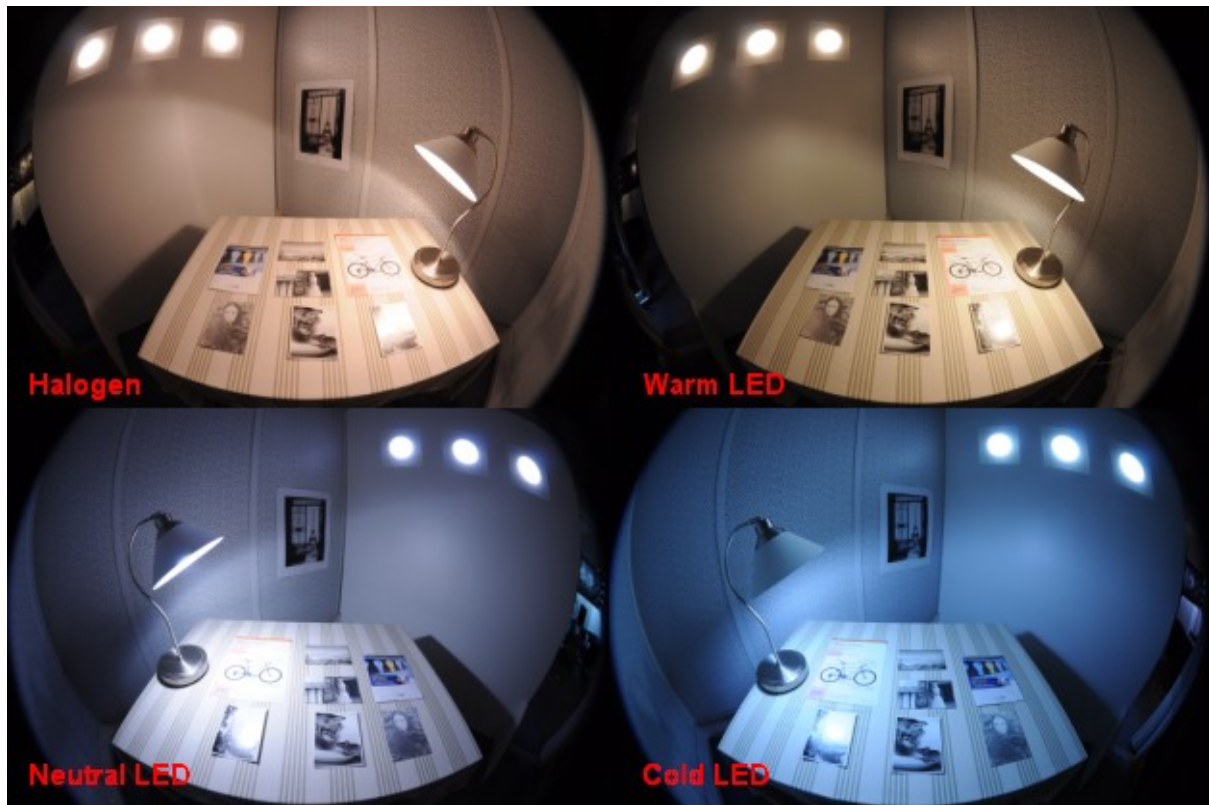


Figure 77 Les quatre configurations des compartiments

### Le bureau subjectif :

Le bureau subjectif (Figure 78 ) est réalisé dans le cadre des expériences sur le confort visuel. Il s'agit d'une véritable pièce bureau de 4,40 par 3,40 mètres dans lequel nous avons rendu la fenêtre obscure avec un tissu noir et placé une planche dans le renforcement de celle-ci. Le sol est en linoléum gris bleu. Les murs sont peints avec un blanc légèrement crème. On retrouve au plafond le panneau diffuseur opaque. Deux plafonniers de quatre tubes de 1m20 sont ajoutés, et peuvent être activés indépendamment des plafonniers présents originellement. Concernant les meubles, nous disposons deux meubles bureaux face à face de 1,80 par 0,80 mètres chacun et deux panneaux en liège sur chaque mur à l'opposé de chaque bureau. Sur chaque côté de chaque bureau se trouvent deux lampes de type architecte et divers matériels de bureau (papier, stylos, post-it,...)



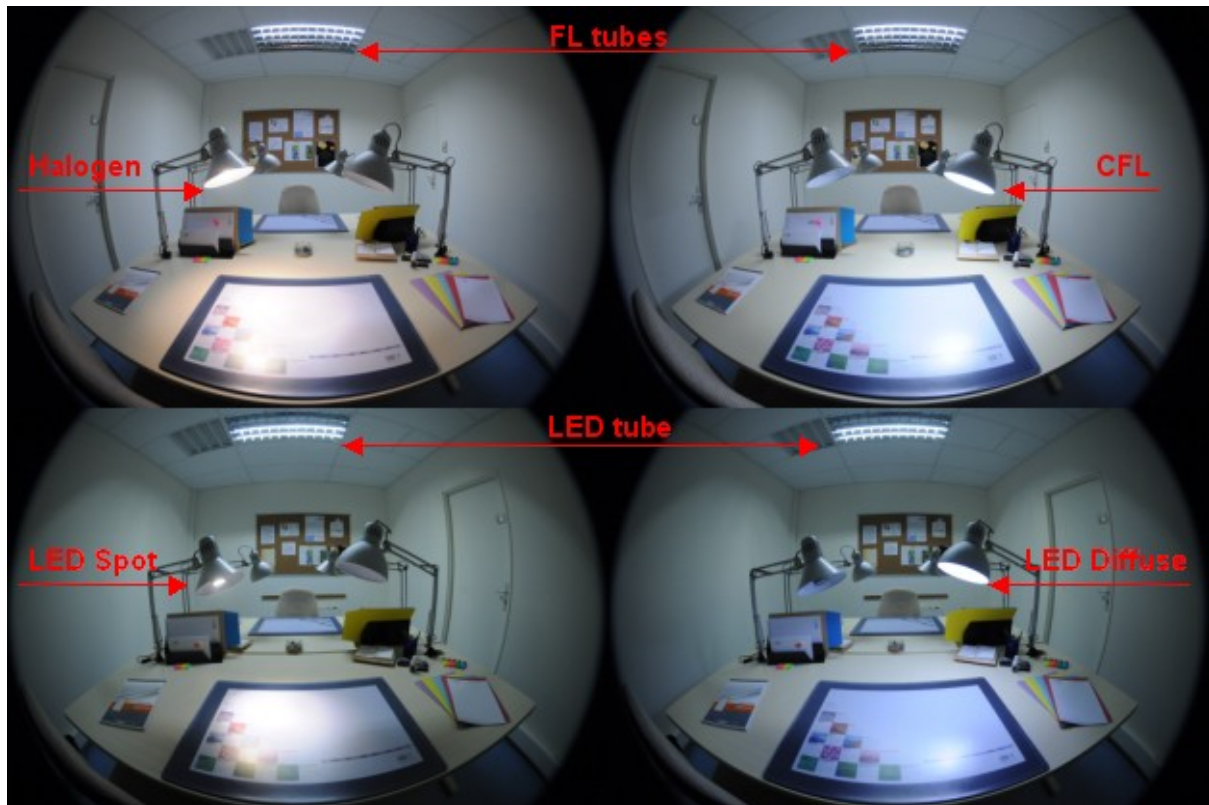


Figure 78 Les quatre configurations du bureau

## But de l'expérience

### Expérience d'éblouissement :

Le but de cette expérience est de comparer l'éblouissement perçu par rapport à l'éblouissement prédit dans les modèles physiques. Notamment l'évaluation de l'éblouissement des sources de nouvelles technologies qui n'existaient pas lors de la création des indices d'éblouissement.

Il est intéressant de vérifier un nombre de points précis vis à vis de certaines théories qui sont peu vérifiées expérimentalement ou dont les résultats sont controversés comme, par exemple, l'additivité des sources ou la présence de sources ayant une très faible taille apparente et une forte intensité.

### Pièce subjective

Le but premier de cette expérience est d'évaluer le ressenti du confort visuel dans un environnement complexe représentatif d'un lieu particulier d'habitation.

Le second but est de déterminer si l'évaluation de l'éblouissement par les panelistes dans un environnement complexe correspond bien aux modèles d'association de sources proposés par la CIE.

Pour ce faire, nous présentons au paneliste une suite de sources plus ou moins éblouissantes. Le paneliste doit se concentrer sur une mire où un ensemble de caractères est marqué tout en évitant de regarder directement la source éblouissante. Pour chaque source présentée, il lui est demandé d'évaluer, comparativement à la source précédente, sa difficulté pour lire une chaîne de caractères et sa sensation d'éblouissement.

Au début de l'expérience, l'observateur compare différents contrastes présents sur la mire centrale.

Puis, il en garde un en référence pour la suite de l'expérience.

A tout moment il est possible à l'observateur de faire une courte pause, notamment s'il sent avoir perdu de l'acuité visuelle suite à un trop fort éblouissement ou à un regard involontaire sur les sources éblouissantes.

### Compartiments :

Le but de cette expérience est d'évaluer les critères de jugement pour le confort visuel tout en minimisant l'impact du critère de l'éblouissement. Pour ce faire, les intensités lumineuses présentes sont peu puissantes et les points sources rarement visibles. Un des critères mis en avant répond aux variations de la température de couleur des sources. En effet, les quatre configurations ont chacune leur propre température de couleur.

L'observateur navigue entre quatre configurations de niveau et de distribution relativement proches. Une des configurations utilise des solutions halogènes, alors que les autres utilisent des DEL de différentes températures de couleur.

### Le bureau subjectif :

Le but premier de cette expérience est d'évaluer le ressenti du confort visuel dans un environnement complexe représentatif d'un lieu de travail.

Dans ce but, nous installons le paneliste dans un bureau dans lequel différentes configurations d'éclairage sont reconstituées. Deux configurations utilisent des sources traditionnelles et deux configurations utilisent des solutions de remplacement.

L'observateur doit parcourir toutes les solutions sans notation dans un premier temps. Puis il lui faut les parcourir dans un ordre défini. Lors de ce deuxième passage, dans chaque configuration, une tâche de lecture sur le panneau en liège est demandée ainsi qu'une tâche

d'écriture. L'observateur doit ensuite évaluer avec quelle facilité il a réalisé ces tâches. Il doit donner des indications sur le ressenti du confort visuel en général.

## Les technologies utilisées

### Expérience d'éblouissement :

Hormis la configuration utilisant de l'halogène qui dispose d'une température de couleur proche de 2700K, toutes les autres configurations disposent d'une température de couleur proche des 4000K.

Pour maintenir les solutions dans un état stable et identique les sources sont allumées deux heures avant le début de l'expérience. Un espace dédié et fermé permet de garder chaudes et à proximité les solutions non évaluées.

La figure ci-dessous (Figure 79 ) présente les sources utilisées lors de cette expérience.

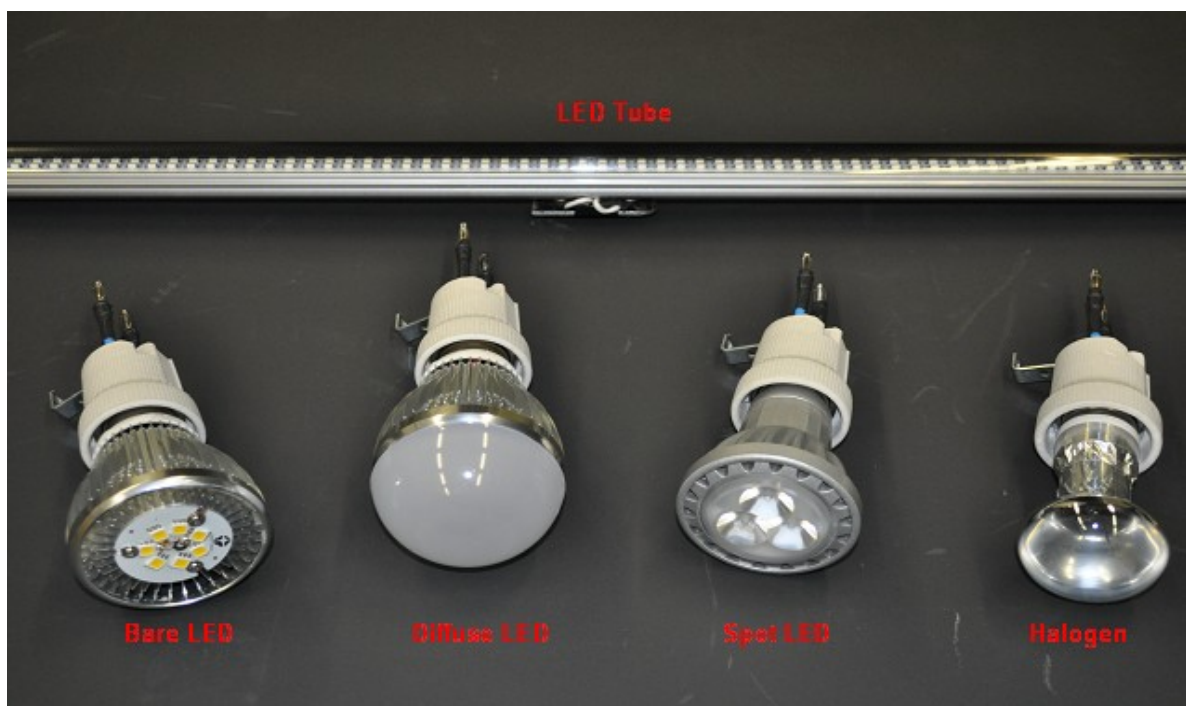


Figure 79 Solutions utilisées dans l'expérience permettant d'évaluer l'éblouissement

### Pièce subjective

Dans la pièce subjective, nous utilisons trois technologies différentes :

De l'halogène, de la DEL avec une excitation dans le bleu recouverte de phosphore jaune et enfin la DEL avec une excitation dans le bleu recouverte de phosphore jaune avec en complément une DEL émettant dans le rouge.



Ces technologies sont, soit disposées uniquement dans les appliques murales, soit combinées avec le plafonnier central.

Toutes les solutions disposent d'une température de couleur proche des 3000K.

Pour maintenir les solutions dans un état stable et identique, les solutions sont allumées deux heures avant le début de l'expérience et maintenues chaudes en dehors de la pièce lorsque celles-ci ne sont pas en cours d'utilisation.

### Compartiments :

Un compartiment utilise uniquement de l'halogène, alors que les trois autres utilisent de la DEL. Les technologies de DEL utilisées sont toutes des DEL avec une excitation dans le bleu et couverte de phosphore jaune, avec parfois l'ajout d'une DEL rouge. Les trois configurations utilisent toutes des DEL de températures de couleur différentes : la première est dans les 3000K, la deuxième 4000 K et la dernière 5 500 K.

Pour maintenir les solutions dans un état stable et identique les solutions sont allumées deux heures avant le début de l'expérience et toutes les solutions restent allumées durant toute la durée de l'expérience.

### Le bureau subjectif :

Dans le bureau, à chaque table correspond un plafonnier. Une des deux lampes est présente sur chacune des tables. Il y a un plafonnier utilisant des tubes fluorescents auquel on peut associer soit une lampe de bureau fluorescente, soit une lampe de bureau halogène. L'autre plafonnier utilise des tubes à DEL. Il est possible d'associer une des deux lampes de bureau utilisant toutes les deux des technologies à DEL avec une excitation dans le bleu et recouverte de phosphore jaune. L'une est diffuse alors que l'autre est de type spot.

Hormis l'halogène qui dispose d'une température de couleur proche des 2700K ; toutes les autres solutions disposent d'une température de couleur proche des 4000K.

Pour maintenir les solutions dans un état stable et identique les solutions sont allumées deux heures avant le début de l'expérience. Les solutions sont partiellement éteintes uniquement lorsqu'un observateur effectue un passage. Cette étape est relativement courte et nous n'avons pas relevé de changements notables.

## Description du protocole d'expérimentation

### Déroulement :

Nous mettons en chauffe les équipements environ deux heures avant le début du test.

Nous procédons à l'accueil d'un à trois observateurs dans une salle de réception annexe. Nous les équipons d'une blouse grise pour que la couleur des vêtements portés n'interfère pas avec les expériences qui suivent.

Nous fournissons des indications générales au sujet des expériences et du questionnaire qui leur est remis. Ces questionnaires sont disponibles en annexe 8. Nous demandons aux participants de remplir une fiche de renseignements (âge, taille, genre, port de lunettes,...)

Ensuite chaque personne est conduite sur le lieu d'une expérience différente où un texte présente l'expérience, la procédure à suivre et le système de notation.

En ce qui concerne le test dans le salon subjectif, comme le sujet porte un système de traçage du regard, un étalonnage de l'appareil est nécessaire au début.

A la fin de chaque expérience, le sujet est raccompagné dans la salle d'accueil où il a 5 à 10 minutes de repos avant d'être conduit sur un autre lieu d'expérimentation.

Une fois que le sujet a passé les quatre ateliers, nous demandons à la personne si elle a des remarques particulières ou des observations à faire.

### Le panel

Pour cette expérience, nous avons eu la chance d'accueillir 50 volontaires âgés de 18 à 62 ans avec un âge moyen de 35 ans. Il y a 26 femmes et 24 hommes. Compte tenu des études traitant de l'éblouissement, il a été mis en évidence que les personnes possédant l'iris claire semblaient plus sensibles à ce phénomène. Dans le cadre de cette expérience 46% des participants avait des yeux foncés.

### Les ordres de passage et organisation

Pour l'expérience sur l'éblouissement :

Pour éviter tout biais dans le jugement d'une solution, par rapport à la situation précédente, nous avons défini plusieurs ordres de passage entre les sources (Table 12 ). Nous avons déterminé ces ordres afin que dans deux séries différentes, nous ayons une comparaison d'une source avec les quatre autres sources : ainsi, avec l'ordre ABCDEA, le B qui est entre les sources A et C, se retrouve entre les sources D et E dans l'ordre complémentaire.

Le tableau ci-dessous présente trois des ordres de passage. Il y a au total 6 ordres différents, qui ont aussi été fait dans le sens opposé (soit 12 ordres).

Ordre des Lampes	///	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Séquence n°1	HS	LN	LS	LD	HS	LT	LN	LD	LT	LS	HS
Séquence n°3	LN	LS	HS	LD	LN	HS	LT	LD	LS	LT	LN
Séquence n°3	LT	LD	LS	LT	HS	LN	LS	HS	LD	LN	LT
<b>LT = DEL Tube, LD = DEL Diffuse, BL = DEL nues, LS = DEL Spot, HS = Halogène</b> <b>Comparaison 1: HS-&gt;LN - Comparaison 2: LN-&gt;LS</b>											

Table 12                      Ordre de passage dans l'expérience évaluant l'éblouissement

Chaque série dispose de 11 passages de lampe. Comme la notation est une évaluation comparative par rapport à la source précédente, la première n'est pas évaluée. Aussi, la première et la dernière source sont les mêmes.

Dans la pièce subjective

Les quatre configurations sont présentées de façon aléatoire.

Dans les compartiments et dans le bureau subjectif

Ces deux expériences disposent chacune de quatre configurations, identifiées avec les lettres A B C D. Dans un premier temps, il est demandé au paneliste de parcourir les quatre configurations dans l'ordre alphabétique sans effectuer de notation pour qu'il ait un aperçu global. Ensuite, il doit parcourir les quatre configurations dans un ordre que nous avons défini et qui varie d'un participant à l'autre

## Présentation des mesures physiques

Nous l'avons vu dans l'expérience sur la couleur, les mesures effectuées sont très importantes. Elles vont permettre d'étudier plus précisément les phénomènes du système de la vision des couleurs par l'être humain. Pour le confort visuel, outre l'apparence des couleurs qui a son importance propre, d'autres phénomènes, comme l'éblouissement, le contraste, le scintillement des sources peuvent apparaître et venir altérer la qualité de l'éclairage. De ce fait, nous comprenons bien qu'il soit impératif d'effectuer des mesures encore plus poussées que pour l'expérience sur le rendu des couleurs, avec notamment une prise en compte de la distribution spatiale des niveaux lumineux. Pour ce faire, nous avons utilisé une caméra photométrique montée sur deux berceaux goniométriques. Après reconstruction des données, nous obtenons une carte des luminances observées et mesurées à la position de l'observateur.

### Spectres optiques

#### Eblouissement

Le graphique ci-dessous (Figure 80 ) représente la distribution spectrale relative de l'éclairement arrivant au niveau de l'œil de l'observateur et intégrant les rayons lumineux issu d'une demi sphère. Ces mesures prennent en compte la source éblouissante, l'éclairement issu du fond diffusant et les diverses réflexions venant du reste de l'environnement.

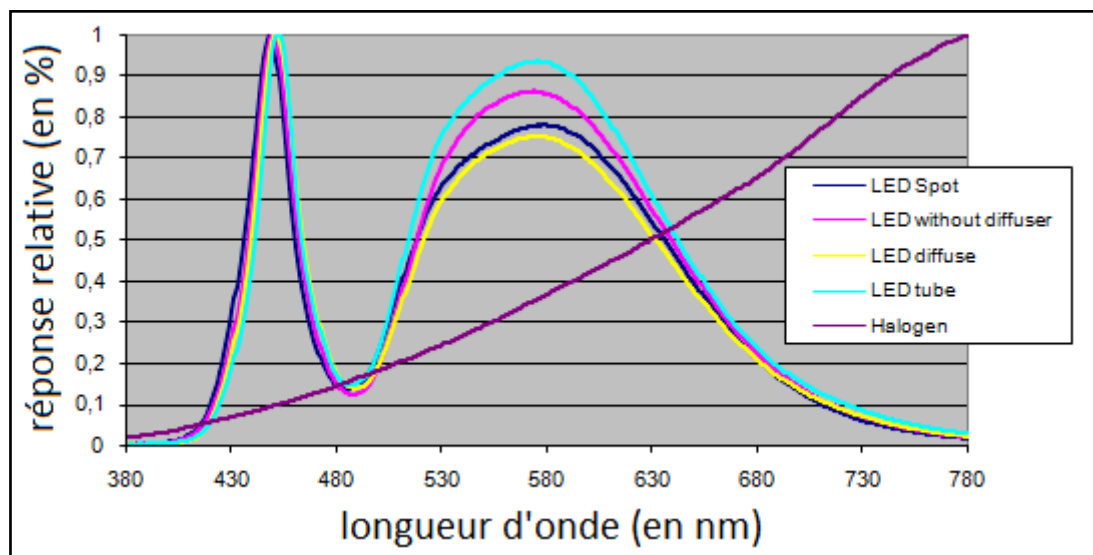


Figure 80 Distributions spectrales relatives des sources utilisées dans l'expérience sur l'éblouissement

Le graphique ci-dessus montre que nous avons des spectres lumineux quasi similaires pour les sources à DEL, seul le spectre de la source halogène est différent. Ainsi on minimise l'éventuel impact de la répartition spectrale sur la sensation d'éblouissement.

#### Pièce Subjective

Le graphique ci-dessous (Figure 81 ) représente la distribution spectrale relative de l'éclairement arrivant au niveau de l'œil de l'observateur et intégrant les rayons lumineux issu d'une demi sphère. La mesure a été réalisé aux deux positions : à la position 1 et à la position 2. Ces mesures prennent en compte l'ensemble des sources et du reste de l'environnement.

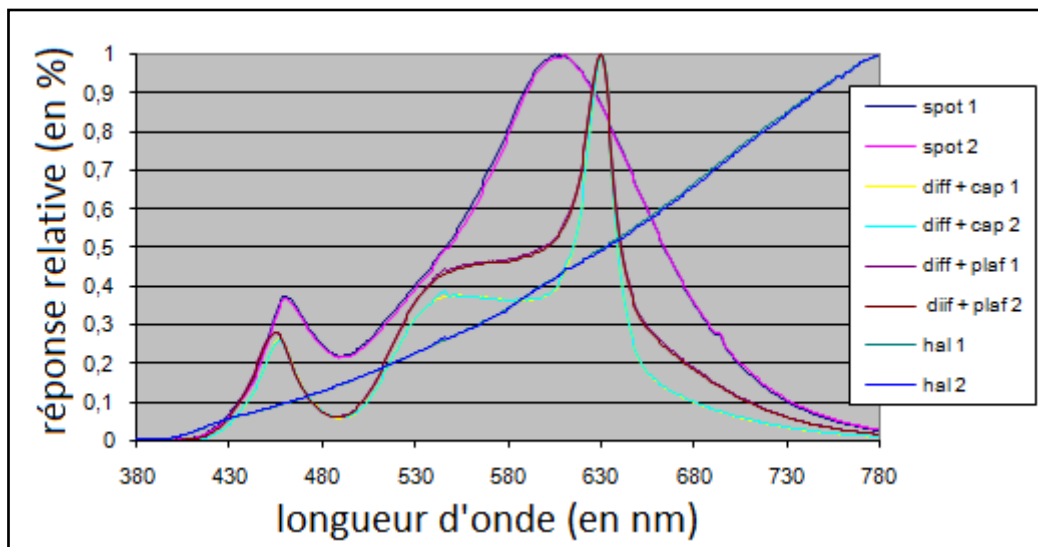


Figure 81 Distributions spectrales relatives des sources utilisées dans le test en salon

Premièrement, on remarque qu'il n'y a pas de différence de spectre entre la position une et la position deux. Il est important de s'assurer de ce point car dans la position une, nous avons l'ensemble des sources murales dans notre champ de vision, alors qu'en position deux, seules certaines sont visibles. Comme dans certaines configurations nous utilisons le diffuseur central et comme les sources positionnées au dessus n'ont pas forcément la même répartition spectrale, il est possible de ne pas obtenir la même distribution en position une et deux. C'est pourquoi l'évaluation se fait pour les deux positions en même temps.

On notera ensuite la présence de la source halogène et de plusieurs technologies de source à DEL qui utilisent toutes une excitation dans le bleu combinée à du phosphore jaune. La solution "DEL diffuse" contient en plus une DEL rouge alors que la configuration DEL diffuse + plafond est constituée d'un mélange de ces deux technologies.

## Compartiments

Le graphique ci-dessous (Figure 82 ) représente la distribution spectrale relative de l'éclairement arrivant au niveau de l'œil de l'observateur et intégrant les rayons lumineux issu d'une demi sphère. Ces mesures prennent en compte l'ensemble des sources et du reste de l'environnement. Durant l'évaluation subjective, l'ensemble des quatre configurations est allumé en permanence. Nous avons donc réalisé ces mesures dans des conditions identiques. Ainsi on remarquera la légère présence d'énergie dans le proche infrarouge pour la configuration utilisant des DEL neutres. Cette présence est en partie due à la proximité de la solution halogène.

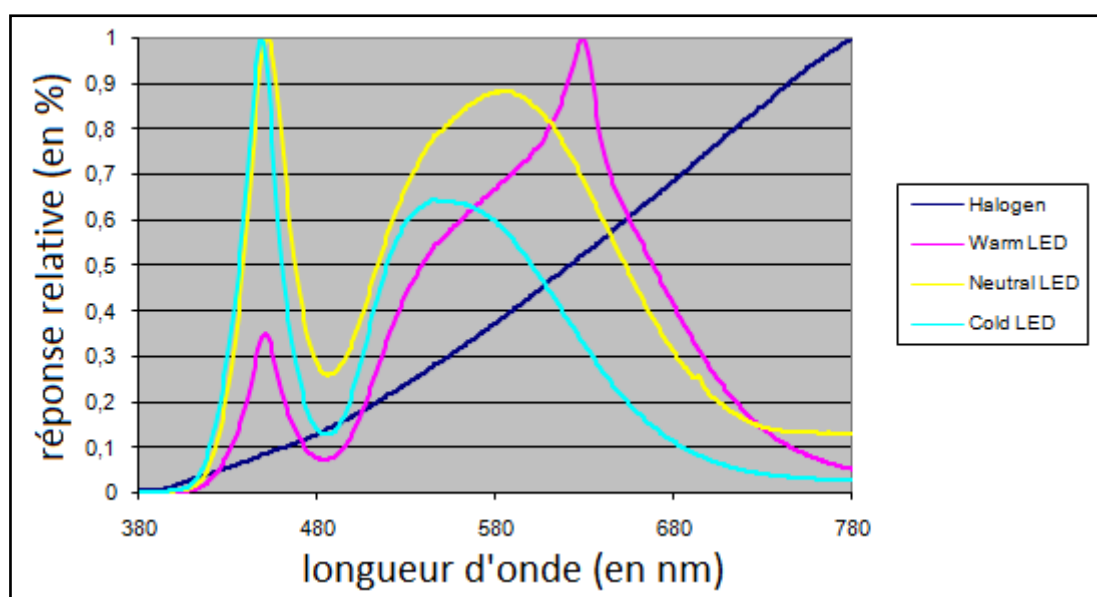


Figure 82 Distributions spectrales relatives des sources utilisées dans l'expérience en compartiments

D'autre part, on peut facilement identifier la nature des technologies à DEL en comparant le pic bleu au pic jaune. Concernant la configuration utilisant les DEL chaudes, une partie des sources disposait d'une DEL rouge.

## Bureau

Le graphique ci-dessous (Figure 83 ) représente la distribution spectrale relative arrivant au niveau de l'œil de l'observateur. Ces mesures prennent en compte l'ensemble des sources et du reste de l'environnement.

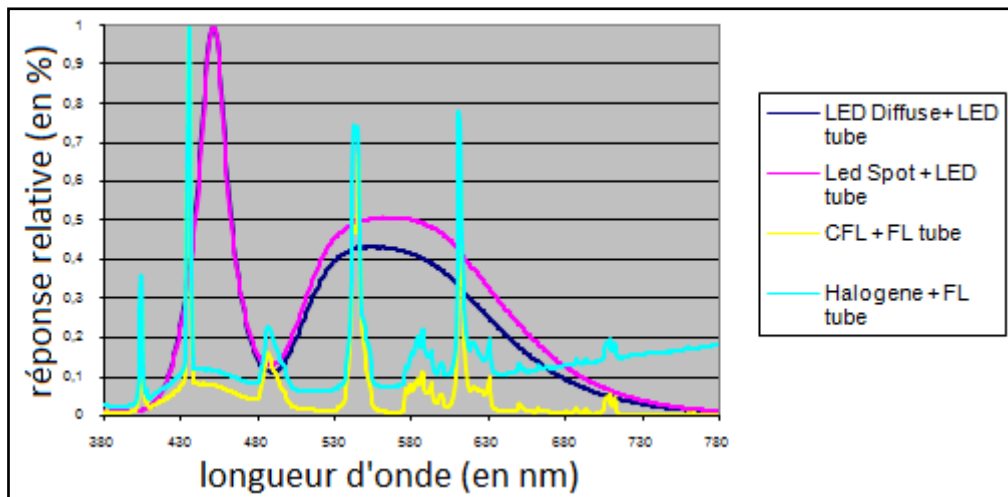


Figure 83 Distributions spectrales relatives des sources utilisées dans l'expérience en bureau

Les technologies à DEL ont des spectres proches les unes des autres, le fluo-compact et les tubes fluorescents aussi. Seule la configuration utilisant les tubes et l'halogène se différencie par la montée progressive d'un spectre présentant de nombreux pics.

## Niveaux de luminance et de température de couleurs

Le tableau ci-après (Table 13 ) présente les luminances sur l'ensemble du champ. Il prend donc en compte le facteur de réflexion des objets.

		Luminances	
		moyennes	CCT (en K)
éblouissement	DEL Spot	20,32	4354
	DEL nue	20,37	4224
	Halogène	22,57	2723
	DEL Diffuse	20,58	4447
	DEL Tube	19,96	4180
Pièce subjective	DEL Diffuse n°1	26,14	2810
	DEL Spot	19,62	2656
	DEL Diffuse n°2	17,51	2860
	Halogène	21,45	2607
compartiments	Halogène	33	2604
	DEL chaudes	24,9	2700
	DEL neutres	29,9	4182
	DEL froides	21,9	5570
Bureau	Halogène + Tube FL	46,25	3302
	CFL + Tube FL	57	4051
	Spot DEL + tube DEL	38,6	3891
	DEL diffuse + tube DEL	42,7	4291

Table 13 Niveaux lumineux et température de couleurs mesurés au niveau de l'œil

Cette information sur la luminance moyenne est à prendre avec précaution. Il s'agit de la luminance globale de la scène, mesurée par une tête optique ayant une réponse en cosinus et positionnée au niveau de l'œil des observateurs. En conséquence, elle prend en compte les facteurs de réflexion des objets, des zones d'ombre, ce qui explique pourquoi ces valeurs peuvent parfois paraître faibles.

Concernant l'expérience sur l'éblouissement, on remarque que, hormis l'halogène, les sources à DEL ont une température de couleur proche. D'autre part, bien que certaines sources aient des intensités élevées, on peut remarquer que la luminance au niveau de l'œil est relativement



identique. Ceci relève du fait que les sources dont l'intensité est plus forte sont celles dont la surface émissive est la plus faible.

Pour la pièce subjective, les variations des niveaux de luminance sont plus importantes, notamment à cause de l'utilisation du panneau diffusant central, qui, lorsqu'il est utilisé (solution DEL diffuse n°1 et solution Halogène), augmente le niveau lumineux dans la pièce sans ajouter une nouvelle source d'éblouissement. D'autre part, il est important de préciser que les valeurs présentées ici sont la moyenne des deux positions. Conformément aux attentes dans un environnement de cette nature, l'ambiance des éclairages est chaude avec une température de couleur proche des 2700K.

Dans les compartiments, nous observons des niveaux lumineux diversifiés. En effet, il est difficile de trouver des sources compatibles avec les luminaires placés sur la table aux puissances et aux températures de couleur souhaitées. On remarquera aussi la distribution des températures de couleur.

Enfin, pour l'expérience dans le bureau, seule la solution halogène se différencie des autres concernant la température de couleur. Le niveau lumineux global est plus important car l'espace de travail, blanc, occupe une grande partie du champ de vision.

## Résultats obtenu avec le Goniocam

Nous allons maintenant présenter les images obtenues avec la caméra goniométrique. L'ensemble des images a été recombinaé pour donner une image en coordonnées  $\theta$   $\phi$ , de 4096 x 4096 pixel. De plus, une réponse logarithmique a été appliquée sur la réponse afin de rendre les données proches de la sensation visuelle ressentie par un observateur. Cependant, les cartes de luminance utilisées par le programme, sont celles avec les valeurs de luminance et non celles avec la réponse logarithmique.

## Eblouissement



Figure 84 Numérisation des niveaux lumineux par le Goniocam pour l'expérience sur l'éblouissement

Ci-dessus, (Figure 84 ) les cartes de luminance obtenues après reconstruction du champ visuel de l'observateur dans l'expérience sur l'éblouissement. On retrouve dans l'ordre suivant : la solution halogène, la DEL diffuse, la DEL nue, le spot à DEL, et enfin le tube à DEL. Du fait du fort contraste entre le niveau du fond, et celui de certaines sources, nous obtenons des inter-réflexions sur l'objectif qui viennent perturber nos mesures d'où la présence d'une deuxième tache lumineuse. Le tableau ci-dessous (Table 14 ) présente les valeurs de luminance moyenne déterminées à partir des cartes de luminance.

<b>Zone n°</b>	<b>DEL Spot</b>	<b>DEL nue</b>	<b>Halogène</b>	<b>DEL diffuse</b>	<b>DEL Tube</b>	<b>moyenne</b>	<b>Ecart type</b>
<b>1</b>	22.9	22.5	21.5	22.8	22.4	22.4	0.6
<b>2</b>	19.1	19.1	20.2	20.8	20.0	19.8	0.7
<b>3</b>	21.4	20.6	24.6	20.3	20.7	21.5	1.8
<b>4</b>	19.9	20.0	22.1	18.9	19.1	20.0	1.3
<b>5</b>	22.7	22.6	21.9	22.5	22.1	22.4	0.3
<b>6</b>	21.1	20.4	20.7	20.3	19.6	20.4	0.6
<b>moyenne</b>	21.2	20.9	21.8	20.9	20.7	21.1	0.5
<b>Ecart type</b>	1.5	1.4	1.5	1.5	1.3		
<b><math>\Omega</math> (msr)</b>	0.049	0.035	0.046	0.478	0.265		
<b>UGR CIE classique</b>	46.2	41.48	34.89	28.61	23.81		
<b>UGR pour les petites sources</b>	32.06	24.71	20.32	26.13	1.99		

Table 14 Luminance de fond et calcul de l'UGR

- La zone 6 couvre la surface de la mire où se trouvent les caractères à lire
- Le fond est uniformément éclairé : nous avons un écart type compris entre 2,5 et 10 %
- Nous avons des valeurs d'UGR bien distinctes : de 23 à 46
- La taille des sources est, elle aussi, variée. Pour le calcul de l'UGR nous avons utilisé la luminance et la position de chaque pixel considéré comme une source grâce aux données recueillies à l'aide du gonio caméra et de ses cartes de luminance.
- Certaines des sources présentes ici ont aussi été utilisées dans d'autres configurations

Pièce subjective



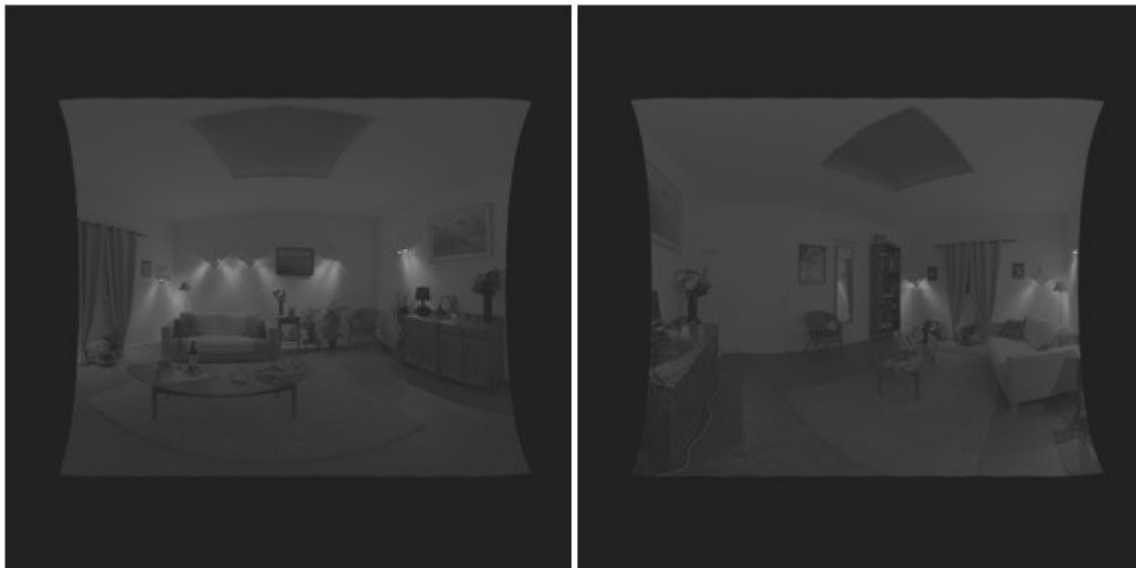


Figure 85 Carte de luminance de l'expérience en salon

Ci-dessus (Figure 85 ), les cartes de luminance obtenues après reconstruction du champ visuel de l'observateur dans l'expérience du salon. On retrouve pour chaque position (gauche = position 1 et droite = position 2) dans l'ordre suivant : la solution halogène, puis celle de la DEL diffuse n°1, pour celle de la DEL diffuse n°2 et enfin celle utilisant les spots à DEL. Dans les configurations utilisant le panneau central, on remarquera la présence d'une ombre plus forte sous la table centrale. Dans la configuration utilisant les spots à DEL, on observe une ombre prononcée des dessertes, à droite de la position 2.

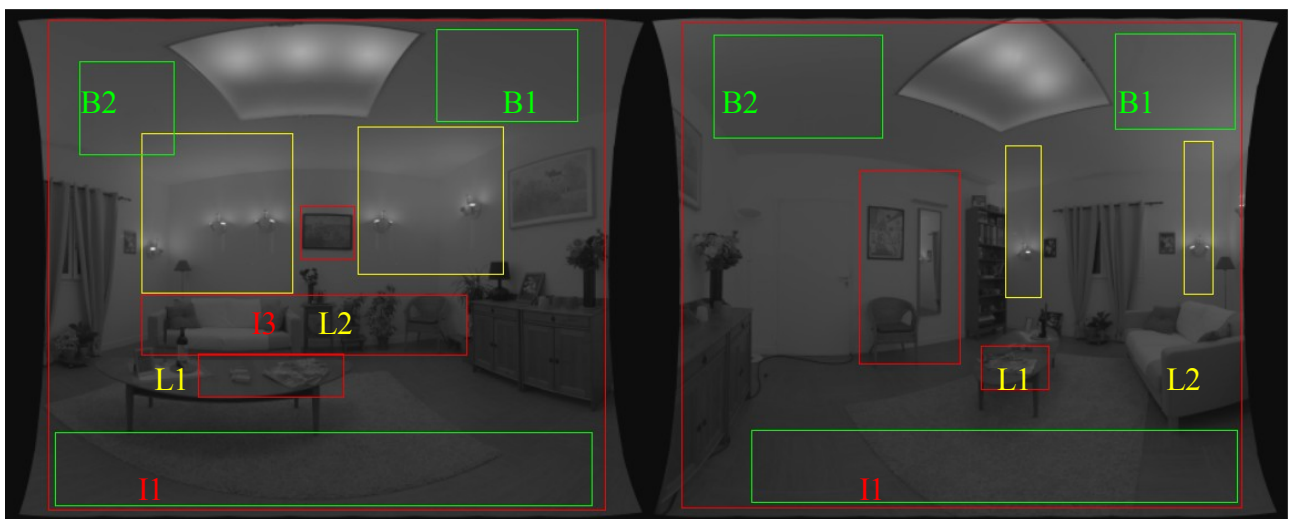


Figure 86 Zones de luminance utilisées dans l'expérience en salon

Zones de calcul (Figure 86 ) de luminance dans le salon (T=Total Zone; Lx = light zone n°x ; Bx = Background zone n°x ; Ix = Interest Zone n°x)

Solution		Position1				Position 2			
		DEL diffuse n°1	DEL à spot	DEL diffuse n°2	Halogène	DEL diffuse n°1	DEL à spot	DEL diffuse n°2	Halogène
<b>T</b>	<b>Moyenne</b>	69.5	57.3	51.8	61.9	68.4	58.3	51.5	60.0
	<b>Ecart type</b>	21.5	17.3	18.8	22.1	18.6	14.8	16.1	19.9
<b>B1</b>	<b>Moyenne</b>	87.8	66.9	59.5	57.9	76.6	63.1	54.2	55.5
<b>B2</b>	<b>Moyenne</b>	75.6	62.8	53.1	55.2	136.5	76.7	80.1	78.5
<b>B3</b>	<b>Moyenne</b>	54.8	42.4	37.2	49.1	57	51.3	41.6	51.3
	<b>Ecart type</b>	4.6	4.3	4.1	4.6	5.0	6.4	4.9	4.3
<b>L1</b>	<b>Moyenne</b>	90.3	80.7	78.9	78.9	82.0	72.3	72.9	70.24
	<b>Ecart type</b>	11.8	15.5	14.4	12.0	12.0	19.4	15.7	12.8
<b>L2</b>	<b>Moyenne</b>	92.6	75.1	81.1	76.7	95.0	82.9	85.8	84.0
	<b>Ecart type</b>	9.5	15.8	11.8	9.88	12.0	12.8	13.7	12.7
<b>I1</b>	<b>Moyenne</b>	54.3	54.4	40.0	49.1	67.6	59.6	53.6	56.4
	<b>Ecart type</b>	16.7	17.9	15.2	16.2	13.5	13.4	13.4	12.1
<b>I2</b>	<b>Moyenne</b>	63.0	50.0	48.0	55.0	56.4	47.3	43.0	49.7
	<b>Ecart type</b>	10.2	12.3	9.9	10.3	11.7	10.4	11.9	10.4
<b>I3</b>	<b>Moyenne</b>	60.0	50.3	45.0	52.5				
	<b>Ecart type</b>	15.3	16.7	14.3	14.2				

Table 15 Luminance et écart type pour les différentes zones du test en salon

D'après la table (Table 15 ) ci-dessus, nous pouvons observer : les DEL Spot ont un écart-type plus important que les autres sources dans les zones L1 et L2. Ceci vient du fait que les DEL Spot ont des niveaux de luminance qui peuvent être très importants ( $>10^6$ cd). A l'inverse, la DEL diffuse n°1 dont le but est de produire une lumière diffuse, a l'écart-type le plus bas.

Les zones de fond ont un écart-type très faible car elles sont uniformes ; nous présentons donc uniquement les valeurs de la zone B3. Note : ces zones de fond correspondent aux zones sans

source de lumière et sans élément d'intérêt, mais ne correspondent pas aux zones de fond utilisées dans les calculs d'UGR.

Solution		DEL Diffuse n°1	DEL à SPOT	DEL Diffuse n°2	Halogène
CIE UGR normal	Position 1	17.8	16.2	9.6	9.4
	Position 2	15.7	13.9	7.7	9.4
Moyenne des deux UGR		16.8	15.1	8.7	9.4

Table 16 Résultats de l'UGR pour le test en salon

Le tableau (Table 16 ) ci-dessus nous montre que la DEL Diffuse N°1 et la DEL spot obtiennent un résultat d'éblouissement moyen, la valeur d'UGR est proche de la valeur "juste perceptible". En revanche, la DEL diffuse n°2 et la solution halogène ont une valeur d'UGR très faible, inférieure à 10. Ces deux niveaux ont été mis en place volontairement afin d'observer le comportement des notes subjectives avec les prédictions dans un environnement complexe.

## Compartiments

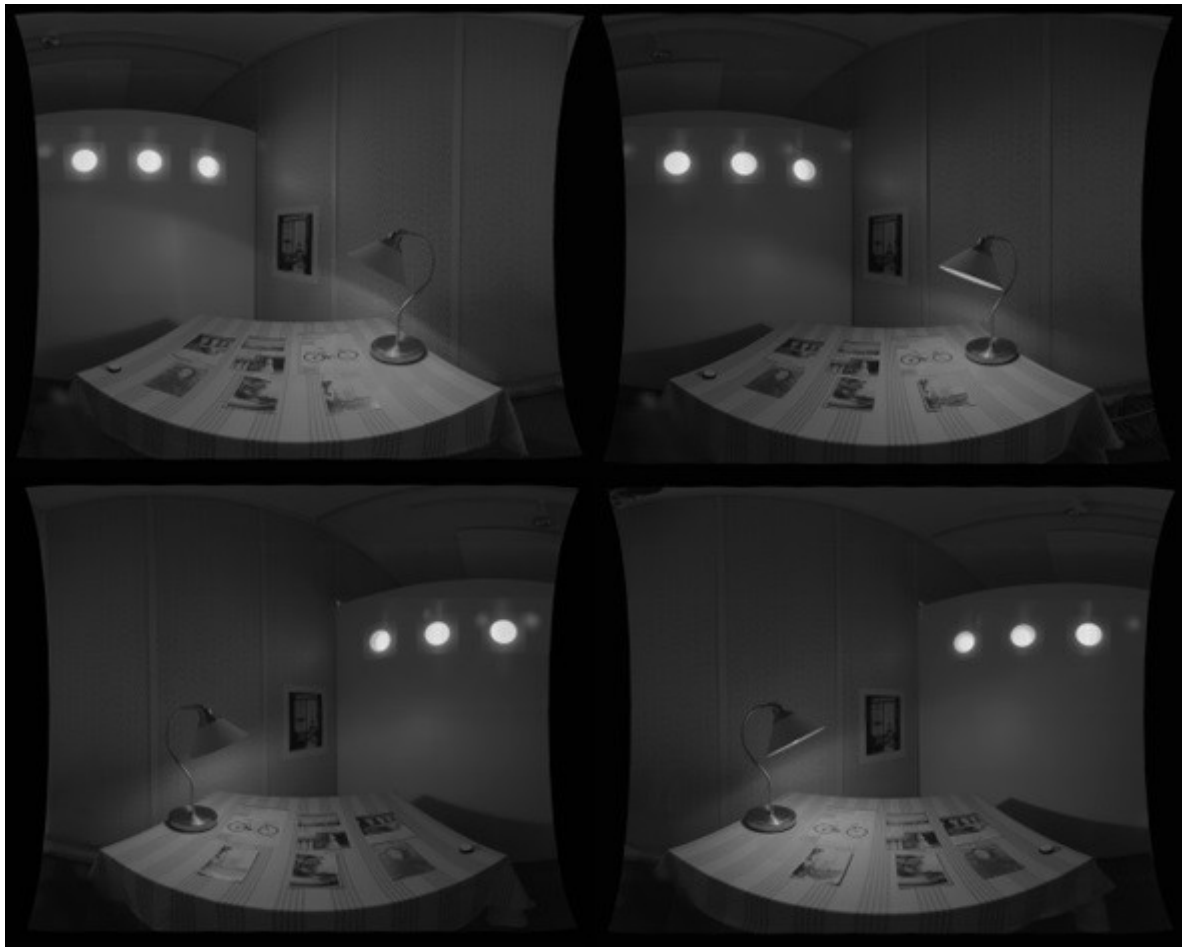


Figure 87 Carte de luminance de l'expérience en compartiments

Ci-dessus (Figure 87 ), les cartes de luminance obtenues après reconstruction du champ visuel de l'observateur dans l'expérience des compartiments. On retrouve les configurations dans l'ordre suivant : l'halogène, la DEL chaude, la DEL neutre et enfin la DEL froide. Nous avons utilisé les zones représentées dans la figure suivante (Figure 88 ) pour nos calculs.

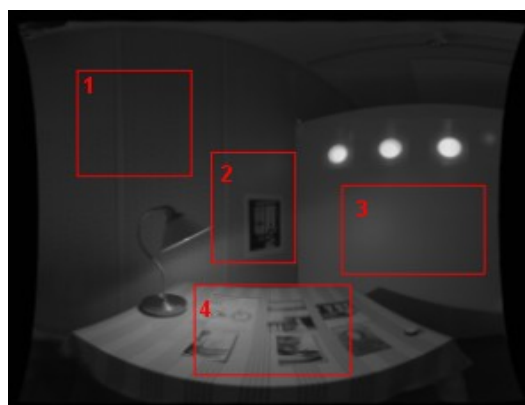


Figure 88 Zones de luminance utilisées dans l'expérience en compartiments



<b>Solution</b>	<b>Zone1</b>	<b>Zone 2</b>	<b>Zone 3</b>	<b>Zone 4</b>
<b>Halogène</b>	11.8	14.8	15.6	43.8
<b>DEL chaude</b>	8.0	8.3	9.6	34.4
<b>DEL neutre</b>	6.2	8.8	11.0	46.4
<b>DEL froide</b>	7.0	8.2	10.5	29.9

Table 17 Luminance de fond calculée pour le test en compartiments

Les zones 1,2 et 3 sont relativement sombres alors que la zone 4 qui représente la zone d'intérêt est éclairée correctement en partie grâce à la lampe présente sur la table (Table 17 ).

<b>Solution</b>	<b>CIE UGR normal</b>
<b>Halogène</b>	16.6
<b>DEL chaude</b>	19.4
<b>DEL neutre</b>	19.9
<b>DEL froide</b>	17.0

Table 18 Résultats CIE UGR du test en compartiments

La table ci-dessus (Table 18 ) présente la valeur de l'UGR calculée. La solution halogène et la solution à DEL froide obtiennent une valeur d'UGR plus faible que les solutions utilisant les DEL chaudes et les DEL neutres. Néanmoins, l'ensemble de ces valeurs est faible et l'échelle de l'UGR a été construite pour qu'une différence de 3 unités corresponde à une variation acceptable de l'éblouissement. Ce qui nous conforte dans l'idée que la gêne liée à l'éblouissement est dans le même ordre de grandeur. D'autant qu'au vu des numérisations, les sources procurant l'éblouissement viennent des luminaires muraux et non de la lampe de la table, qui est plus proche de la zone d'intérêt.

## Bureau

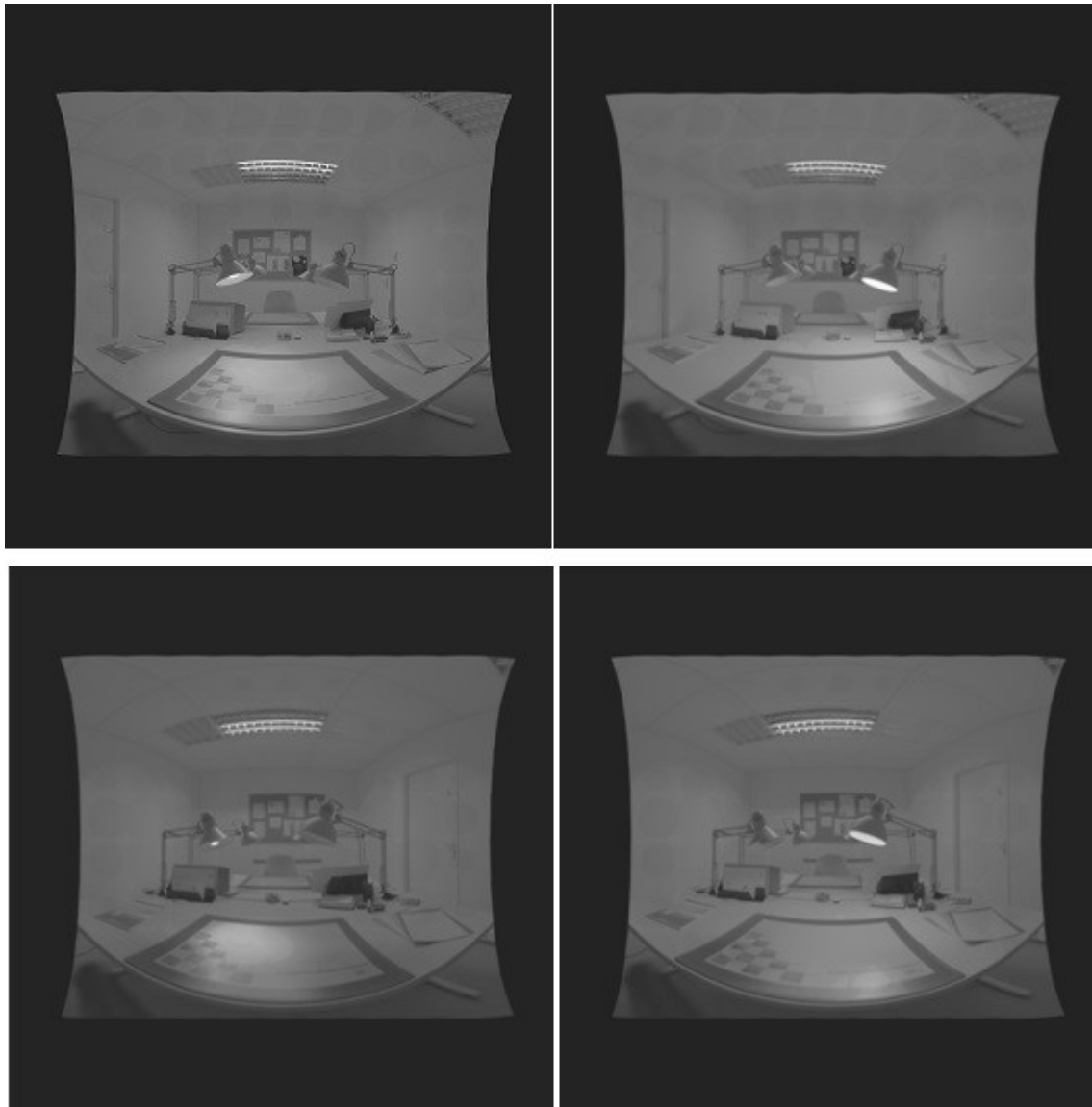


Figure 89 Carte de luminance de l'expérience en bureau

Ci-dessus, (Figure 89 ) les cartes de luminance obtenues après reconstruction du champ visuel de l'observateur dans l'expérience du bureau. On retrouve les technologies suivantes : les tubes fluorescents avec de l'halogène, puis la lampe fluo compacte avec les tubes. En dessous, à gauche, le spot à DEL avec les tubes à DEL et à droite la DEL diffuse avec les tubes à DEL. Nous avons utilisé les zones représentées dans la figure suivante (Figure 90 ) pour nos calculs.

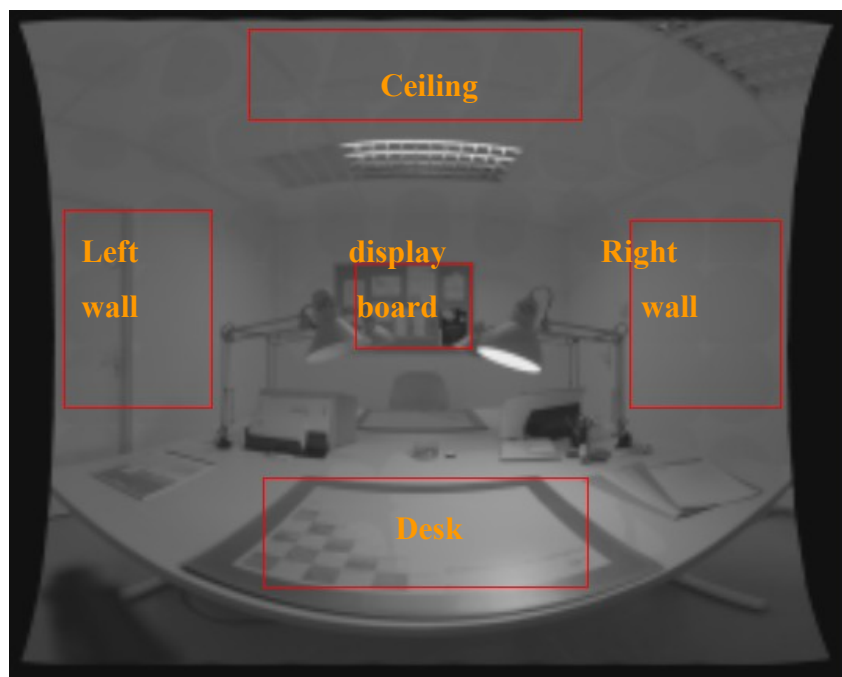


Figure 90 Zones de luminance utilisées dans l'expérience en bureau

Solution	Ceiling light	Luminance Background on the desk	Luminance Background on the display board	Luminance Background on the left wall	Luminance Background on the right wall	Luminance Background on the ceiling
Halogène	FL tube	72	33	41	45	38
CFL		96	35	46	47	40
DEL spot	DEL tube	51	29	43	38	34
DEL diffuse		53	29	43	38	34

Table 19 Luminance de fond calculée pour le test en bureau

D'après les mesures exposées dans la table ci-dessous (Table 19 ), nous observons: la zone du plan de travail est lumineuse du fait de l'éclairage direct des lampes de bureau. Les murs sont uniformément éclairés. Le panneau mural a des valeurs plus faibles, mais il ne faut pas oublier que notre moyen de mesure prend en considération les facteurs de réflexion des objets, et que le liège a un facteur de réflexion plus faible que la peinture claire présente sur les murs. Les solutions de tubes à DEL ont des valeurs plus faibles que les solutions de tubes fluorescents.

Solution	Type de plafonnier	CIE UGR
Halogène	tube FL	15.0
CFL		19.0
spot à DEL	tube à DEL	22.1
DEL diffuse		20.9

Table 20 Résultats CIE UGR du test en bureau

L'UGR (Table 20 ) prend en compte la contribution des sources sur le bureau et dans le plafonnier. Nous avons pu identifier, grâce au calcul, que la contribution principale venait des sources présentes au plafond ; les tubes à DEL présentant un plus fort éblouissement. Une faible part provient des luminaires présents sur le bureau. Le CFL présente plus d'éblouissement à cause de son interaction avec le réflecteur du luminaire.

### Résultats obtenus avec l'Eyetracker

Comme présenté dans la première partie, l'Eyetracker est un appareil permettant de mesurer des paramètres sur le comportement du système visuel humain. Des deux caméras filmant la position des yeux, nous pouvons en déduire un diamètre relatif de la pupille (Figure 91 ).

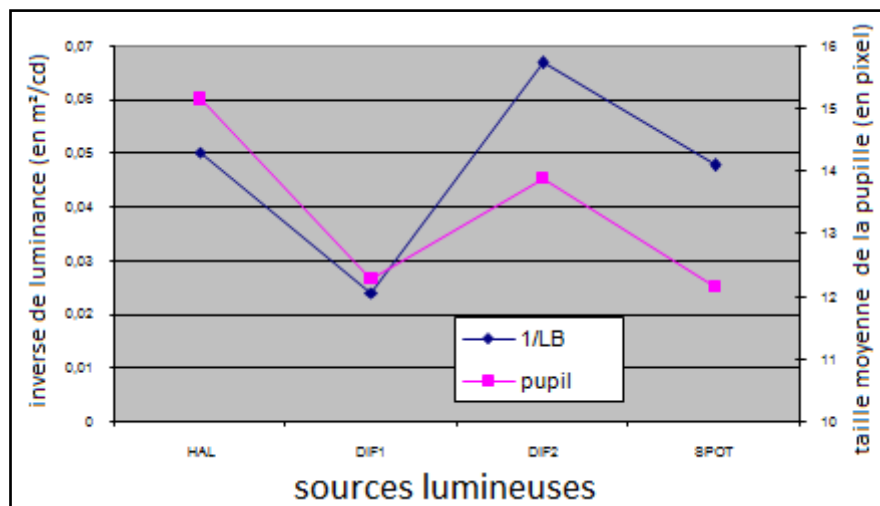


Figure 91 Taille relative de la pupille avec l'inverse des niveaux lumineux.

Dans le cadre particulier de notre travail, nous avons pu vérifier l'hypothèse d'une recherche menée à l'INRIM [XXX]. Cette étude détaille l'impact des composantes spectrales de la lumière bleue sur la rétine. Grâce à l'utilisation de l'eyetracking, nous avons pu vérifier les

suppositions élaborées. Ainsi le graphique suivant (Figure 92 ) présente la bonne corrélation entre la taille de la pupille avec l'inverse des niveaux lumineux pondérés par la présence des longueurs d'onde bleue.

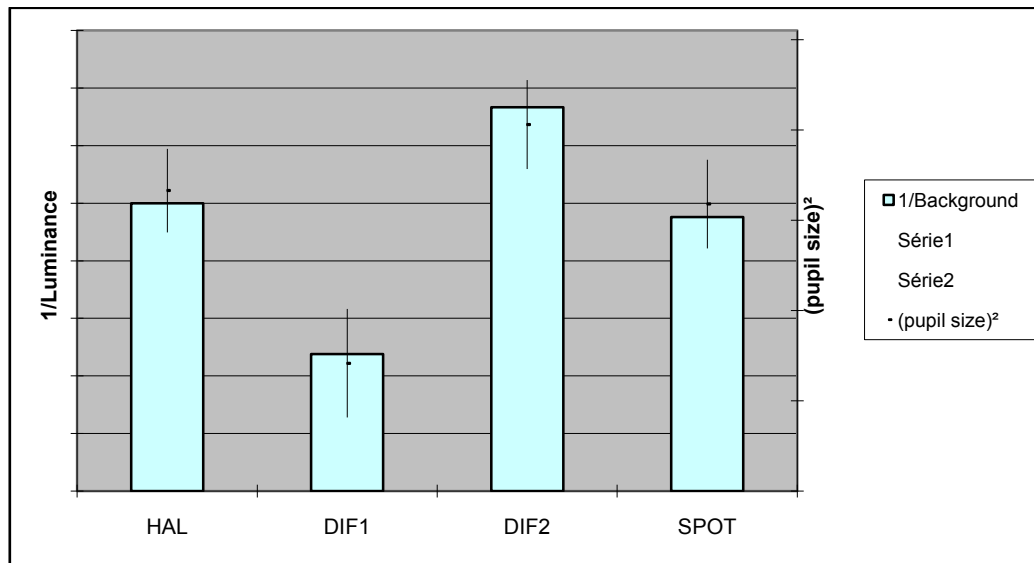


Figure 92 Taille relative de la pupille avec l'inverse des niveaux lumineux et un facteur correctif lié à la quantité de bleu

Avec l'Eyetracker, il est aussi possible d'observer les mouvements de chaque œil et donc d'en déduire le mouvement du regard après calibration de celui ci, car la morphologie de l'individu influence cette mesure. De plus, et grâce à la caméra frontale, il nous est ainsi possible de déterminer les objets regardés ou les zones évitées.

## Présentation des résultats subjectifs

Dans cette session, nous allons présenter les résultats obtenus lors de l'expérience sur le confort visuel. Il s'agit de résultats bruts moyennés sur l'ensemble des sujets. Les résultats bruts se trouvent en annexe 4.

### Moyenne des notes

#### Étude statistique préalable

Comme pour l'expérience sur le rendu des couleurs, une analyse statistique a été effectuée; j'ai utilisé le programme "statgraphics". Ce programme permet de calculer le test de Différence Significative Minimale (LSD) de Fisher pour réaliser les moyennes des groupes dans une

analyse de variance. La Figure 93 expose ces moyennes pour le paramètre du confort dans l'expérience en bureau. Les autres statistiques sont consultables en annexe 7.

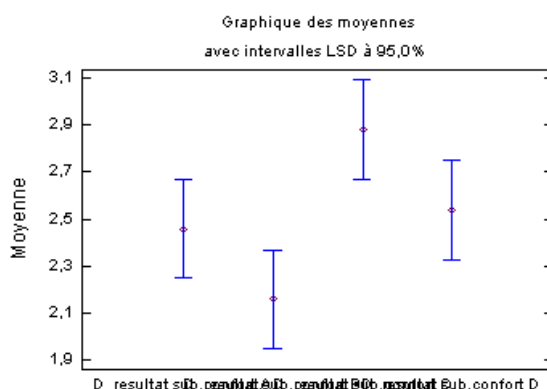


Figure 93 Analyse LSD pour le paramètre du confort dans le bureau

## Eblouissement

L'expérience sur l'éblouissement a été une des expériences pour laquelle les résultats ont été les plus difficiles à exploiter. En effet, pour chaque individu, chaque source a été comparée avec les autres sources. Il est demandé d'évaluer si la nouvelle source est plus éblouissante que l'ancienne. L'échelle est donc une échelle relative.

Ainsi, les observateurs notent s'ils trouvent que la source présentée est « beaucoup plus », « un peu plus », « identique », « un peu moins » ou « beaucoup moins » éblouissante que la source précédente ; mais aussi, si la lecture de l'ensemble des caractères présents sur la mire centrale est « plus difficile », « un peu plus difficile », « identique », « un peu plus facile » ou « plus facile » qu'avec la source précédente.

Comme il y a différents ordres de passage, certains jugements s'opèrent dans un sens et d'autres dans le sens opposé : par exemple, un observateur évalue la DEL spot en ayant la source halogène en référence, alors qu'un autre évalue l'inverse.

A partir de ces comparaisons, l'ensemble des évaluations est remis en forme en faisant l'hypothèse que le jugement inverse conduit à un résultat opposé : dans l'exemple ci dessus de notre observateur ayant évalué la DEL spot, si je souhaite obtenir l'évaluation inverse (I.E. l'halogène par rapport à la DEL Spot) la note de « beaucoup plus » donne « beaucoup moins » et inversement, celle de « un peu plus » donne « un peu moins » « identique » reste « identique ». Il en est de même avec la notation sur la difficulté de lecture.

Note :

Pour chaque duo de lampes, il y a approximativement la moitié des comparaisons dans un sens et l'autre moitié dans l'autre sens. En regardant la moyenne des notes fournies dans un sens et en la comparant à celle obtenue dans l'autre sens, nous sommes globalement symétrique à la note « identique ». L'hypothèse de départ semble donc raisonnable.

Pour la suite, nous avons affecté une valeur numérique pour traduire le degré d'éblouissement de chaque solution. La note de 5 correspond à une source qui a été évaluée toujours « beaucoup plus » éblouissante que les autres sources, 4 « un peu plus », ... 1 pour une source « beaucoup moins »

Le graphique ci-dessous (Figure 94 ) montre les notes moyennes obtenues pour chaque duo dans les deux sens.

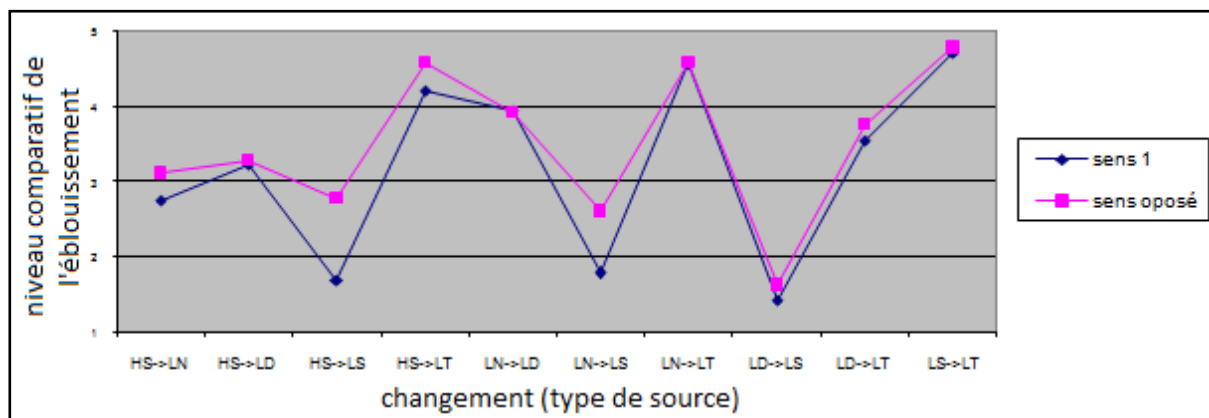


Figure 94 Moyennes des notes dans les deux sens

La même démarche a été effectuée concernant la notation de la difficulté à lire.

Le tableau ci-dessous (Table 21 ) présente les résultats obtenus pour les solutions testées. On observe que la DEL spot semble la plus éblouissante alors que la DEL tube est « la moins » éblouissante. Le classement entre l'éblouissement et la difficulté pour lire est le même, mais l'amplitude est plus importante pour l'éblouissement.

	Eblouissement	lire
LS	3,93	3,49
HS	2,94	3,16
LN	3,33	3,27
LD	2,43	2,90
LT	1,57	2,65

Table 21 Notes des critères à évaluer lors de l'expérience sur l'éblouissement

#### Pièce subjective

Dans la pièce subjective, il y a quatre paramètres à évaluer :

- le confort, qui se compose de sept possibilités de réponse: «très confortable», «confortable», «peu confortable», «peu inconfortable», «inconfortable», «très inconfortable» et la dernière possibilité «sans opinion». Une valeur numérique est attribuée en fonction de chaque note ; ainsi « 6 » est attribué à l'évaluation «très confortable» et « 1 » à «très inconfortable».
- l'éblouissement avec, comme possibilité: «imperceptible», «juste perceptible », « juste tolérable », « entre confortable et inconfortable », «juste inconfortable», «juste intolérable». Comme précédemment, une valeur numérique est attribuée en fonction de chaque note: ainsi « 1 » est donné pour un éblouissement «imperceptible» et « 6 » pour «juste intolérable».
- l'apparence colorée des objets avec seulement quatre réponses possibles: «oui, beaucoup», «assez», «pas trop» et «pas du tout». « 4 » est attribué à la note «oui beaucoup» et « 1 » à «pas du tout».
- le degré de similarité des solutions avec celles qu'utilise l'observateur chez lui. Les choix sont: «très similaire», «assez similaire», «peu similaire» ou «pas du tout similaire». « 4 » est attribué à la note «très similaire» et « 1 » à «pas du tout similaire».

La moyenne des notes obtenues est effectuée pour les différents critères. Elle est présentée ci-dessous (Table 22 et Figure 95 ).

	confort	Eblouissement	Rendu des couleurs	Similarité avec chez-soi
Halogène	4,84	1,46	2,74	2,14
DEL diffuse n°1	4,68	2,44	2,98	2,08
DEL diffuse n°2	4,88	1,38	2,64	2,14
DEL Spot	4,92	2,10	2,90	2,14

Table 22 Notes des critères à évaluer lors de l'expérience en salon

Tout d'abord, nous pouvons remarquer que le facteur de similarité par rapport à l'éclairage personnel des participants est quasi identique pour toutes les configurations, avec une valeur légèrement plus faible pour la configuration de DEL diffuse n°1. Sachant que la valeur 1 a été assimilée au degré « très similaire », 2 « assez similaire », 3 « peu similaire », 4 « pas du tout



similaire », nous pouvons avancer que, dans l'ensemble, les solutions proposées sont relativement proches des scénarii utilisés chez les participants avec une certaine homogénéité des réponses. Il faut bien garder en mémoire qu'il n'est pas possible que tous les participants possèdent un environnement personnel identique. La configuration de la pièce paraît donc cohérente et appropriée pour nos mesures.

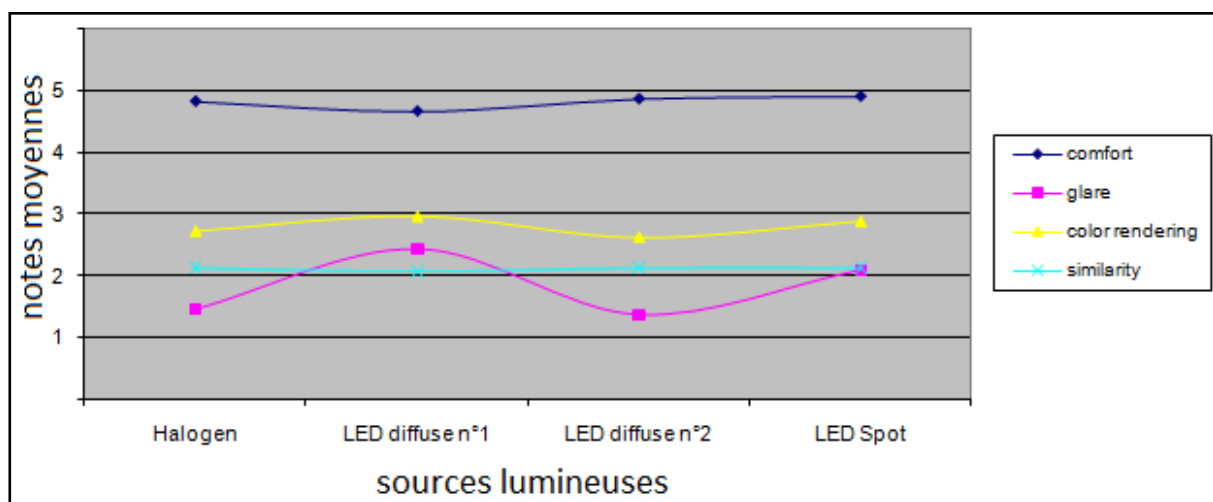


Figure 95 Graphique des résultats de l'expérience en salon

### Expérience en compartiments

Dans cette expérience, il y a trois paramètres à évaluer par les observateurs. A cela s'ajoute pour finir un classement des configurations par ordre de préférence.

Pour l'ensemble des paramètres, il est possible de les juger : « très bon », « bon », « moyen », «insuffisant » ou « très insuffisant ».

Une valeur numérique est attribuée en fonction de chaque note : « 5 » est attribué à l'évaluation « très bon » et « 1 » à « très insuffisant ».

Le premier paramètre à évaluer est relatif au confort et à l'agrément général de la configuration, le second à la facilité de visualisation des différents objets présents dans l'environnement et le dernier critère est relatif aux documents (photo, dépliant) et la capacité de l'éclairage à faire ressortir les qualités de ces supports (contraste, dominante couleurs).

Concernant le classement final, si la solution est la préférée, elle obtient 4 points, 3 en 2ème position, 2 en 3ème position, et 1 point si c'est la moins appréciée. Le total des points est effectué puis divisé par le nombre d'observateurs afin d'obtenir le classement général moyen.

Le tableau ci-dessous (Table 23 ) présente la moyenne obtenue pour l'ensemble des observateurs. Nous pouvons déjà remarquer qu'il y a une différence entre la configuration utilisant l'halogène et la Warm DEL bien que ces deux scénarii aient des températures de couleurs proches (Figure 96 ).

	Confort/ agrément	Facilité de visualisation	Qualité des photos/texte	Moyenne générale	Résultat du classement
DEL neutre	2,76	2,94	2,92	2,87	2,76
Halogène	2,78	2,98	2,76	2,84	2,62
Warm DEL	2,42	2,56	2,52	2,50	2,26
COLD DEL	2,32	2,72	2,90	2,65	2,36

Table 23 Notes des critères à évaluer lors de l'expérience en compartiments

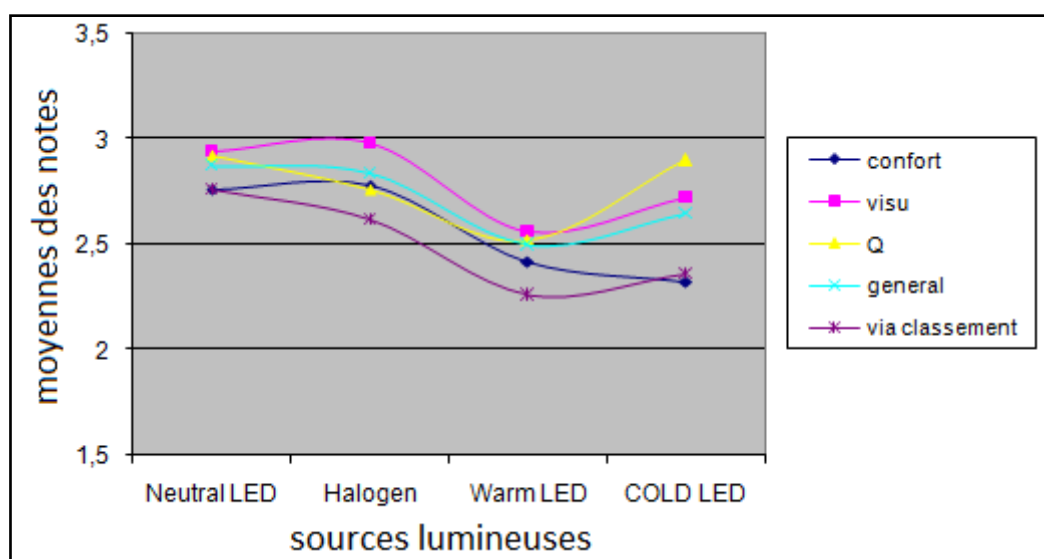


Figure 96 Graphique des résultats de l'expérience en compartiments

## Bureau

Dans cette expérience, il y a trois paramètres à évaluer par les observateurs. Comme dans l'expérience précédente, il est demandé, en dernier lieu, de classer les configurations par ordre de préférence.

Pour l'ensemble des paramètres, il est possible de les juger : « très bon », « bon », « moyen », «insuffisant » ou « très insuffisant ».

Une valeur numérique est attribuée en fonction de chaque note ; ainsi « 5 » est attribué à l'évaluation « très bon » et « 1 » à « très insuffisant ».

Le premier paramètre à évaluer est relatif au confort et à l'agrément général de la configuration, le second à la facilité de visualisation des différents objets présents dans l'environnement et le dernier critère est relatif à la tâche d'écriture.

Concernant le classement final, si la solution est la préférée, elle obtient 4 points, 3 en 2ème position, 2 en 3ème position, et 1 point si c'est la moins appréciée. Le total des points est effectué puis divisé par le nombre d'observateurs afin d'obtenir le classement général moyen.

Les résultats ci-dessous (Table 24 et la Figure 97) présentent la moyenne obtenue pour l'ensemble des observateurs. D'une manière générale, les différents paramètres ont la même variation entre les différentes configurations.

	Confort /agrément	Facilité de visualisation	Facilité d'écriture	Moyenne générale	Résultat du classement
a	2,54	2,92	2,88	2,78	2,66
b	2,84	3,26	3,08	3,06	2,98
c	2,12	2,26	2,42	2,27	1,80
d	2,46	2,54	2,64	2,55	2,56

Table 24 Notes des critères à évaluer lors de l'expérience en bureau

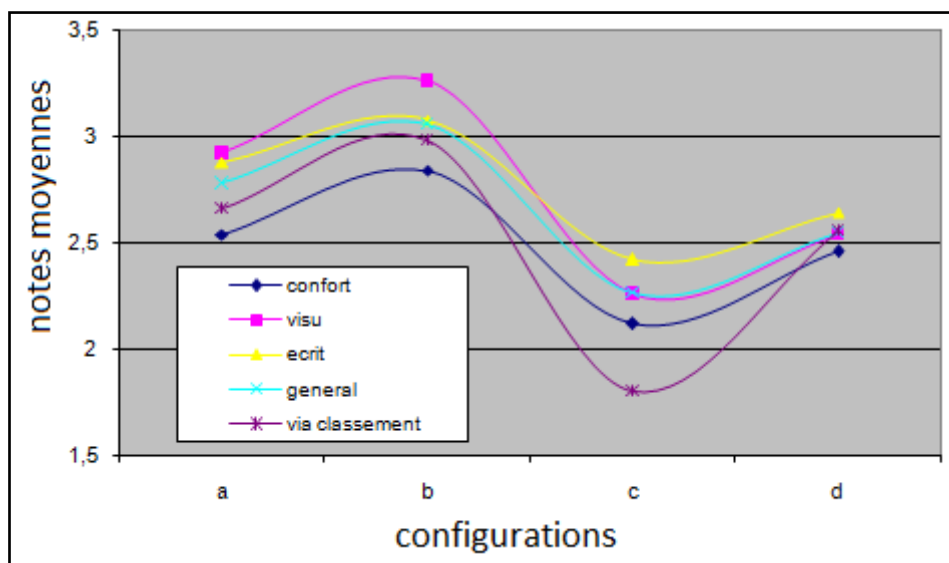


Figure 97 Graphique des résultats de l'expérience en bureau

## Quatrième partie

# Exploitation des résultats et développement

L'objectif principal de notre étude consiste à confronter les données photométriques caractérisant les scénarii d'éclairage avec les données subjectives recueillies.

Les différents travaux de recherche cités au deuxième chapitre et les résultats obtenus dans le cadre des expériences menées au sein du LNE complétés par notre étude constituent une base exploitable de résultats.

A partir de ces données, nous avons extrait divers descripteurs qui permettent d'envisager de nouveaux indicateurs pour les sources traditionnelles et celles utilisant de nouvelles technologies. Une fois ces axes influents identifiés, une étude approfondie met en évidence l'impact de ces paramètres clefs.

L'exploitation de ces derniers nous a conduit à envisager un certain nombre de développements ayant pour but l'amélioration des métriques existantes concernant le rendu des couleurs et à la création d'un modèle capable de prédire le confort visuel.

Nous pousserons notre analyse pour évaluer si les améliorations proposées restent compatibles avec les données subjectives exposées précédemment.

## Rendu des Couleurs

Dans un premier temps, nous effectuerons des inter-comparaisons des résultats de métriques exposées dans le deuxième chapitre calculées pour un ensemble de 122 spectres représentatifs du marché. Cela nous permettra d'étudier les métriques les plus pertinentes. Dans un second temps, nous comparerons les résultats de ces dernières dans le cas concret de notre expérience subjective et nous les comparerons avec les résultats subjectifs évalués par les panélistes.

Dans un troisième temps, nous approfondirons notre étude en nous focalisant sur l'impact de certains paramètres relatifs aux étapes de calculs des métriques (échantillons de couleur, facteur d'adaptation). Cela nous permettra de mieux comprendre quels peuvent être les paramètres influençant les métriques existantes.

Enfin nous proposerons une amélioration d'indice sur la définition de l'indice du rendu des couleurs

Nos calculs utilisent deux jeux de sources : les sources utilisées dans notre expérience subjective, déjà présentées dans le chapitre précédent, et un ensemble de 122 spectres sélectionnés pour leur diversité et leur présence sur le marché (Figure 98 ). Ces solutions sont classées par catégories pour pouvoir identifier l'impact par technologie. Ainsi, on retrouve respectivement : les lampes incandescentes, fluorescentes (tubes et fluo-compactes), de technologies à haute pression enfin les différentes possibilités qu'offrent les technologies à DEL. Le code couleur des graphiques suivants a été défini :

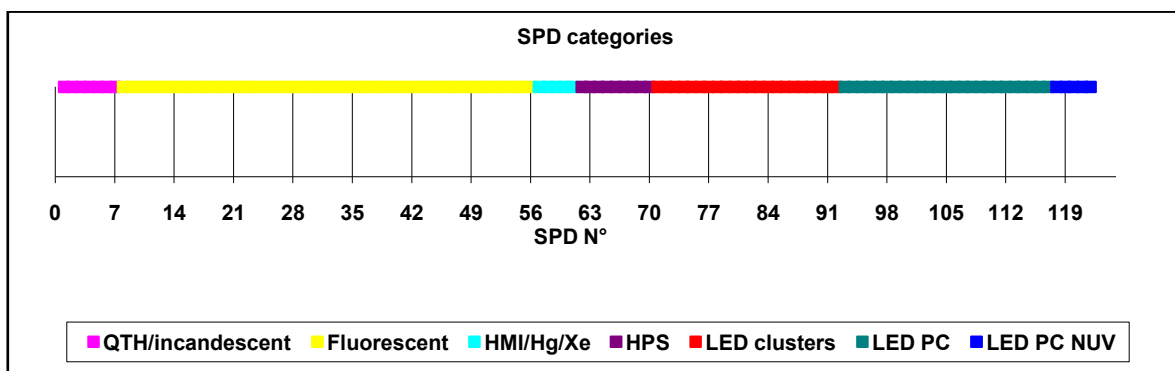


Figure 98 Catégorie et répartition des 122 spectres considérés

## Comparaison des métriques existantes

Il existe de nombreuses métriques, plus ou moins récentes, qui mettent en avant certains paramètres de sources tels que la saturation des couleurs, la capacité à reproduire certaines couleurs ou l'espace occupé dans un espace colorimétrique. Le but de cette section est d'étudier les différences entre les métriques afin, notamment, d'identifier celles qui produisent des résultats similaires et les métriques atypiques. Cette analyse va nous permettre de sélectionner un nombre plus restreint de métriques pour la suite de notre étude, en éliminant les métriques trop proches ou celles qui ne nous semblent pas appropriées.

Ainsi, dans cette partie, nous allons exposer la corrélation entre les différentes métriques du rendu des couleurs présentées au chapitre II. Ce travail a été en partie réalisé dans le cadre de [ENG05]. Il se compose de deux parties, (1) la compilation des résultats des métriques pour l'ensemble des 122 sources sélectionnées, et (2) la corrélation entre les métriques utilisant l'ensemble des 122 sources ou un nombre plus restreint mais appartenant à certains types de technologies (par exemple LED).

Le tableau ci-dessous (Table 25) présente les corrélations entre métriques.

métrique	CIE CRI Ra	CQS	CRI CAM UCS	RCRI	MCRI	FCI + Ra	GAI+Ra
CIE CRI Ra		0.953	0.983	0.909	0.748	0.723	0.961
CQS			0.978	0.922	0.839	0.825	0.861
CRI CAM UCS				0.944	0.815	0.769	0.915
RCRI					0.825	0.728	0.827
MCRI						0.884	0.587
FCI + Ra							0.556

Table 25                      Corrélations des métriques avec la base de 122 spectres.

L'ensemble des métriques présentées va permettre d'évaluer le rendu des couleurs selon différentes approches. Nous avons développé, pour effectuer cette tâche, un programme permettant de calculer les résultats de chaque métrique qui pourra être utilisé pour caractériser les éclairages présents dans nos expériences. De plus, nous avons sélectionné un lot de 122 spectres de sources représentatives des technologies présentes et futures. Nous avons ensuite comparé les résultats obtenus pour chaque métrique sur notre base des 122 spectres. Ainsi nous avons pu déterminer les avantages distincts entre chaque métrique en fonction des

technologies utilisées en vue d'en sélectionner un petit nombre représentatif de l'ensemble des métriques pour nos développements futurs.

La synthèse de cette étude montre certains points particuliers :

Toutes les métriques de fidélité, notamment avec les nouveaux espaces de couleur, attribuent des indices de rendu sensiblement identiques pour l'ensemble des sources considérées.

Les métriques comptant positivement le gain de chroma vis-à-vis de la référence (GAI MCRI FCI CQS) attribuent des indices de rendu qui sont plus élevés pour les sources à DEL en comparaison aux indices de fidélité. Par ailleurs, ces métriques donnent des résultats identiques aux métriques de fidélité pour les sources fluorescentes.

## Corrélation des métriques avec l'expérience subjective

Dans cette partie, nous allons nous intéresser aux corrélations entre les métriques et les résultats subjectifs obtenus dans le cadre de l'expérience sur la couleur que nous avons conduite.

La figure ci-dessous (Figure 99 ) présente la moyenne des notes subjectives de préférence obtenue avec le résultat de cinq métriques sélectionnées.

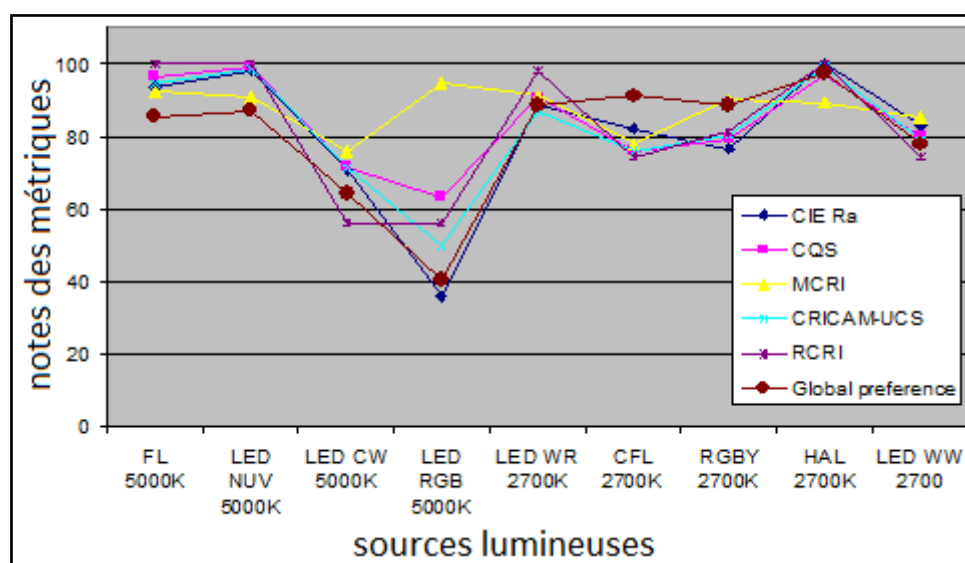


Figure 99 Résultats des métriques et score de la préférence subjective

On remarque qu'aucune métrique n'est capable de prédire avec précision la préférence des utilisateurs pour l'ensemble des sources. On remarque cependant que pour les sources froides, sauf le MCRI, les quatre autres métriques présentent une relativement bonne prédiction. La source RGB qui obtient la plus faible préférence, obtient le meilleur résultat pour le MCRI et un résultat moyen pour le CQS ; cela est dû au gain de chroma que présente cette source qui

favorise très fortement le MCRI et moyennement le CQS. L'excès de chroma pourrait être pris en compte dans le CQS. Nous observons que les fonctions de similarité du MCRI favorisent les sources à très forte chroma, ceci peut-être dû à l'expérience subjective qui a permis d'établir les fonctions de similarité en isolant les objets colorés évalués.

Pour les sources chaudes, on remarque que l'on n'a pas de bonne prédiction mais les écarts sont nettement moins importants que dans le cas des sources froides ce qui demande plus de précision des prédictions pour donner le même classement subjectif.

Notre expérience subjective permet de vérifier que l'halogène est une source bien appréciée. Elle est aussi la source de référence pour toutes les métriques sauf le MCRI, on obtient donc une bonne prédiction pour cette source.

Pour toutes les métriques, les sources CFL et RGBY ne corréllent pas avec les prédictions subjectives et inversent les comparaisons avec les deux autres sources (LED WR et LED WW).

Certaines inversions s'opèrent sur le classement de source par exemple, l'ensemble des métriques prédisent un résultat meilleur pour la LED WR (A80 Osram) que pour la solution CFL. Or, les observateurs préfèrent cette dernière.

Pour mieux voir l'apport des nouvelles métriques, nous avons étudié les corrélations de Pearson et de Spearman. La table ci-dessous (Table 26 ) montre les corrélations de Pearson entre des métriques et la préférence subjective. Les sources ont été classées par famille (chaudes/froides) ainsi que par technologies (LED).

Métriques	Toutes les sources	Les sources froides	Les sources chaudes	Les DEL	Les LED Froides	Les LED chaudes
<b>CRI Ra</b>	0.912	0.998	0.576	0.923	0.998	-0.044
<b>CQS Qa</b>	0.762	0.961	0.581	0.839	0.948	0.500
<b>MCRI</b>	0.130	0.016	0.235	0.162	-0.159	0.991
<b>CRI-CAMUCS</b>	0.862	0.996	0.634	0.921	0.996	0.596
<b>RCRI</b>	0.783	0.894	0.602	0.842	0.860	0.725
<b>GAI</b>	-0.761	-0.690	0.006	-0.797	-0.757	0.945

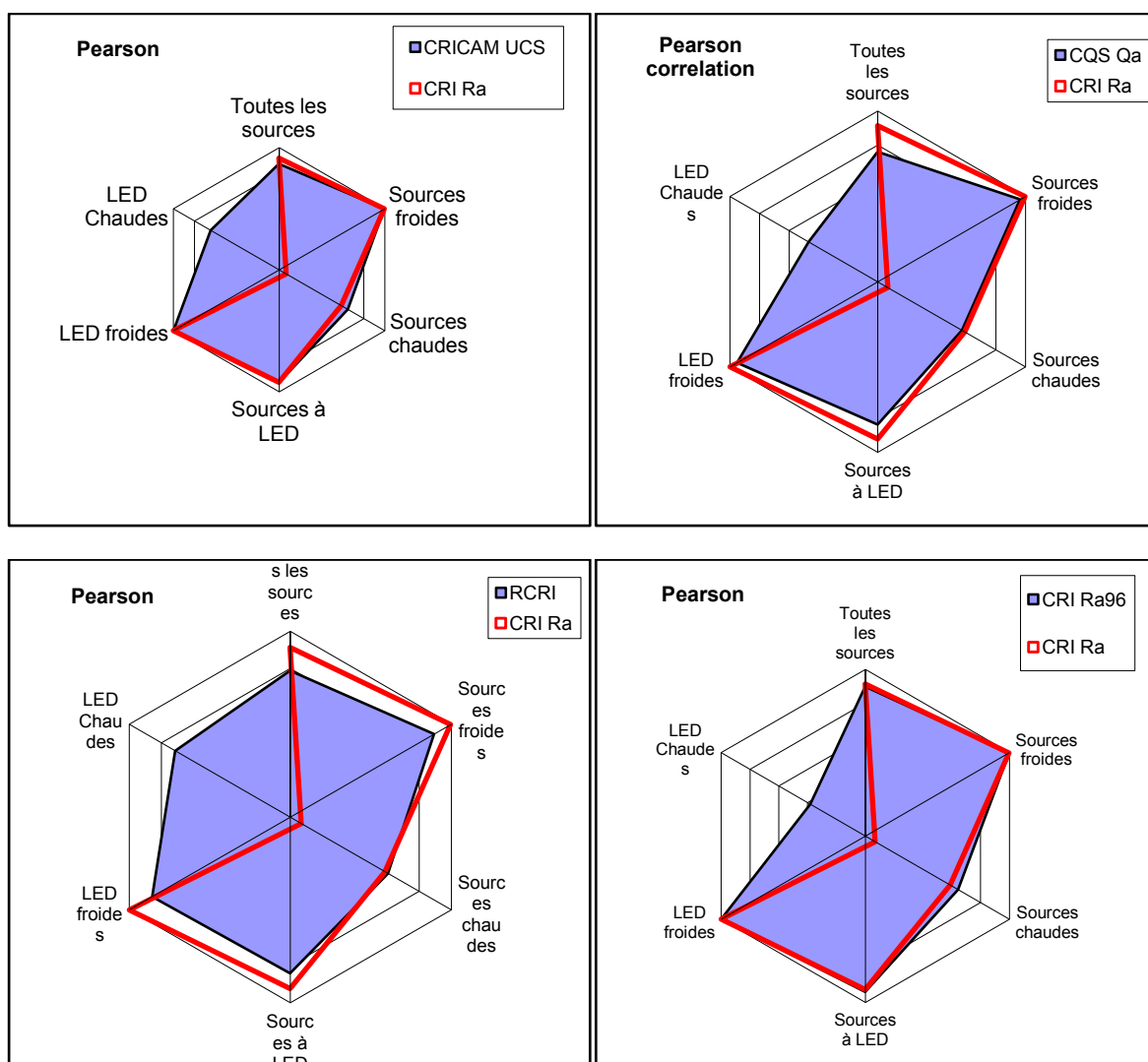
Table 26 corrélations métriques-préférence subjective

Tout d'abord on remarque que l'indice de la CIE, le CRI reste la métrique ayant la meilleure corrélation globale avec le ressenti subjectif. Cependant, la corrélation de cette métrique



diminue avec les sources chaudes et davantage encore lorsque que l'on regarde uniquement les sources à LED chaudes. A l'inverse, les métriques telles que le MCRI et le GAI, qui ont des coefficients de corrélation faible pour l'ensemble des sources ont de très bons coefficients pour les sources à LED chaudes.

Pour comparer la corrélation de Pearson du CRI Ra et la corrélation de Pearson de chacune des autres métriques avec les résultats subjectifs, nous avons étudié les résultats en figures radars présentées ci-dessous (Figure 100 ).



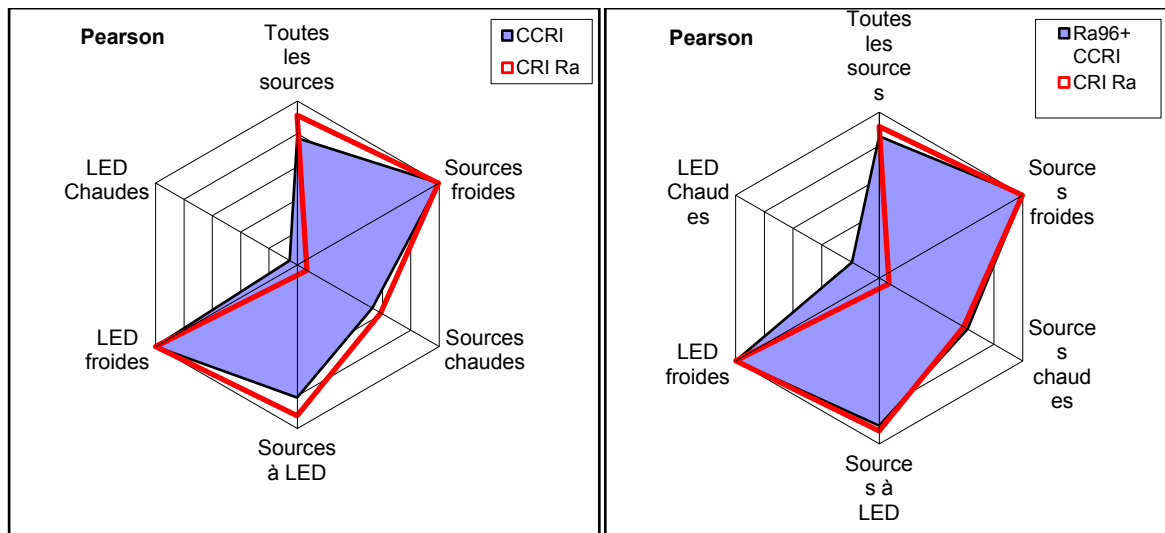


Figure 100

Figures radars

Nous remarquons qu'il y a une amélioration significative des sources DEL chaudes pour le Ra96, CQS, CRICAMUCS02 et le RCI. Seul le CRICAMUCS02 présente des corrélations aussi bonnes que celle du CRI pour les autres sous ensembles avec une amélioration importante pour les DEL chaudes.

Le CRICAMUCS02 semblerait la meilleure métrique pour remplacer le CRI, mais compte tenu du nombre limité de sources étudiées dans notre expérience subjective, il faudrait d'autres expériences subjectives pour confirmer ce résultat. Néanmoins le CRICAMUCS02 ne classe pas les sources chaudes selon la préférence et donc d'autres études sont nécessaires pour la prédiction de la préférence.

## Impact de certains paramètres

### Impact des TCS

L'un des points clés relatifs à la majorité des métriques existantes est l'utilisation de TCS (échantillons colorés). Les TCS sont, par leur nature et leur nombre, très déterminants du résultat final. Nous allons nous intéresser à ces deux aspects, plus particulièrement sur la métrique du CRI2012 qui propose, à la base, 4 jeux de TCS. Commençons par, étudier l'impact du nombre de TCS avant d'aborder l'influence de la nature de ceux ci.

CRI2012, impact du nombre de TCS :

Pour étudier l'impact du nombre de TCS, nous avons fondé notre étude sur le CRI2012. En effet, cette métrique nous permet de proposer quatre jeux de TCS d'emblée : un jeu composé

de 17 TCS mathématiques, trois jeux de 17, 210 et 1000 TCS réels. Nous connaissons le facteur de mise à l'échelle « K » sur uniquement deux jeux de TCS (17 mathématiques et 210 réels). Dans un premier temps, nous avons utilisé un facteur K arbitraire (Table 27 ).

k	1/44	1/55	2/45	2/75
	17 REAL	17 MATH	210 real	1000 real
halogène	99,76	99,61	99,41	99,33
DEL nuv	98,91	98,74	98,26	98,34
Tubes Fluorescent	97,99	97,48	96,59	96,24
DEL WR	91,42	89,75	85,77	86,36
DEL WW	83,49	84,83	77,31	80,8
DEL RGBY	83,22	82,87	76,38	76,06
DEL CW	71,82	73,65	67,81	68,22
cfl	74,29	68,25	60,55	57,76
DEL RGB	57,4	60,85	49,72	47,34

Table 27 résultats du CRI 2012 avec les facteurs K d'origine

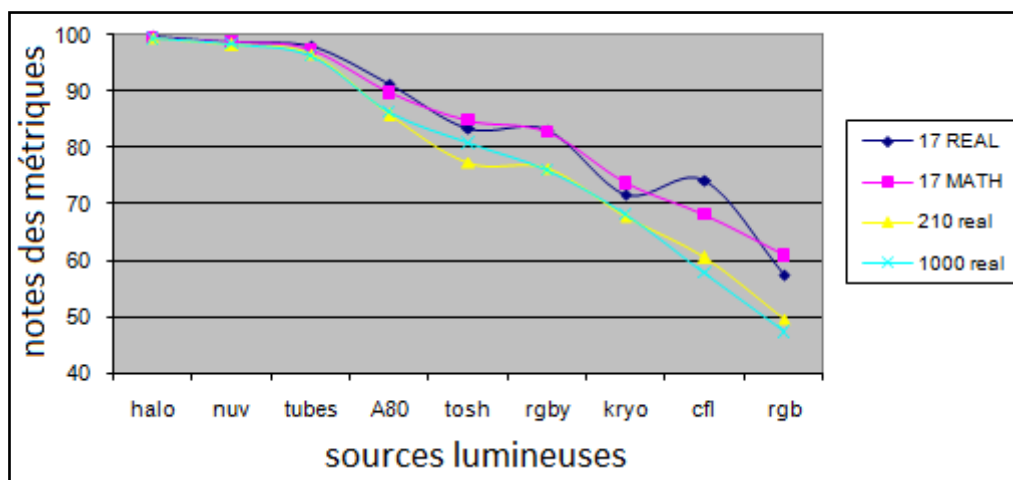


Figure 101 Classements des résultats du CRI2012 avec les facteurs d'échelle K d'origine

Sur la courbe ci-dessus (Figure 101 ), on peut observer une tendance légèrement différente pour le jeu des 17 TCS réels, avec une inversion entre deux solutions (Kryona et CFL).

Il est difficile d'étudier précisément les variations car on a une divergence des résultats dans les valeurs faibles.

Toutefois, les références bibliographiques du nCRI nous apprennent de quelle manière a été déterminée le facteur K: par rapport aux valeurs obtenues sur des illuminants de référence de la CIE (F1 à F12).

Il apparaît donc que le facteur K est paramétré de façon grossière ( $\pm 1\%$  sur le résultat final). Nous avons donc déterminé quatre nouveaux facteurs pour les quatre jeux de TCS afin d'obtenir une valeur beaucoup plus uniforme sur les échantillons F1 à F12.

Nous avons choisi le facteur K égal aux valeurs suivantes :

- de 1/55 (inchangé) pour les 17 échantillons mathématiques :
- de 1/43,065 pour les 17 échantillons réels
- de 1/26,649 (au lieu de 2/45) pour les 210 échantillons réels
- de 1/46,7 pour les 1000 échantillons réels

On obtient, avec les facteurs ci-dessus, une valeur de  $75.99 \pm 0.005$  sur la moyenne des f1-f12.

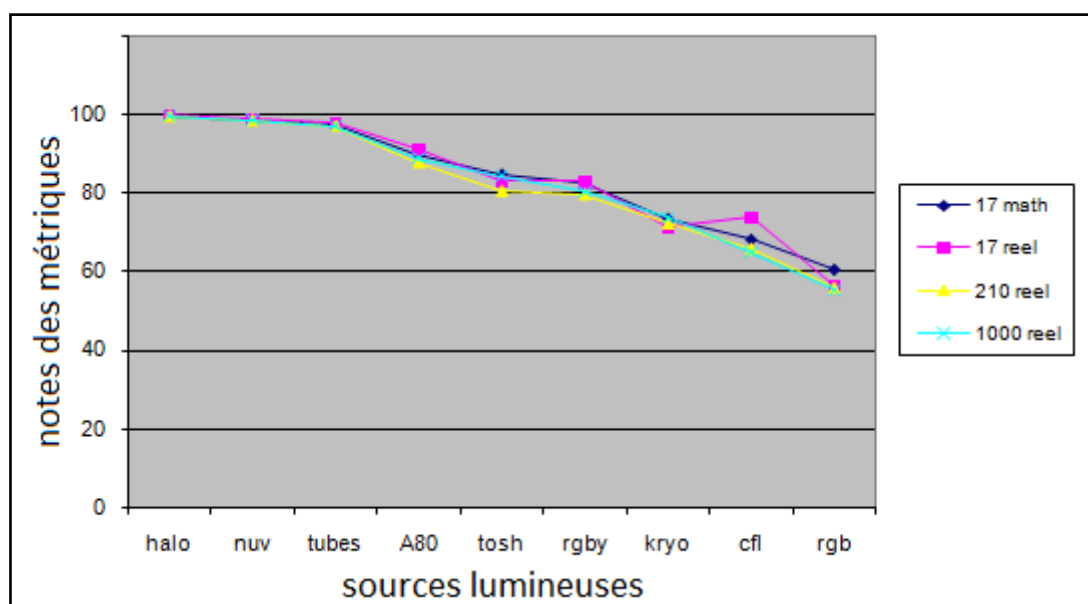


Figure 102 Classements des résultats du CRI2012 avec les nouveaux facteurs d'échelle k

Avec ces facteurs, nous observons (Figure 102 ) toujours l'inversion des deux solutions avec les 17 TCS réels. Nous remarquons aussi que les résultats produits avec les 17 TCS mathématiques et les 1000 TCS réels donnent des résultats proches. Ce qui veut dire qu'au-delà d'un certain seuil minimal supérieur à 17, et lorsque le jeu de TCS a été bien choisi, leur nombre n'a plus une influence de grande importance. Notons tout de même qu'un grand jeu de TCS pourrait permettre une étude plus approfondie notamment sur le rendu de certaines

teintes proches ou de couleurs particulières. Par ailleurs, le jeu de 17 TCS mathématiques semble, lui, suffisant.

Développement de nouveaux jeux mathématiques :

Pour bien comprendre l'impact que peuvent avoir les TCS, nous avons introduit de nouveaux jeux mathématiques de TCS (Figure 103 ).

Nous avons fait évoluer le nombre de TCS présents : 9, 17, 20, 40 TCS en utilisant la même forme de TCS (note : le jeu de 20 TCS reprend le même jeu que les 17 TCS mathématiques de la métrique originale avec l'addition de 3 TCS dans le proche infra rouge)

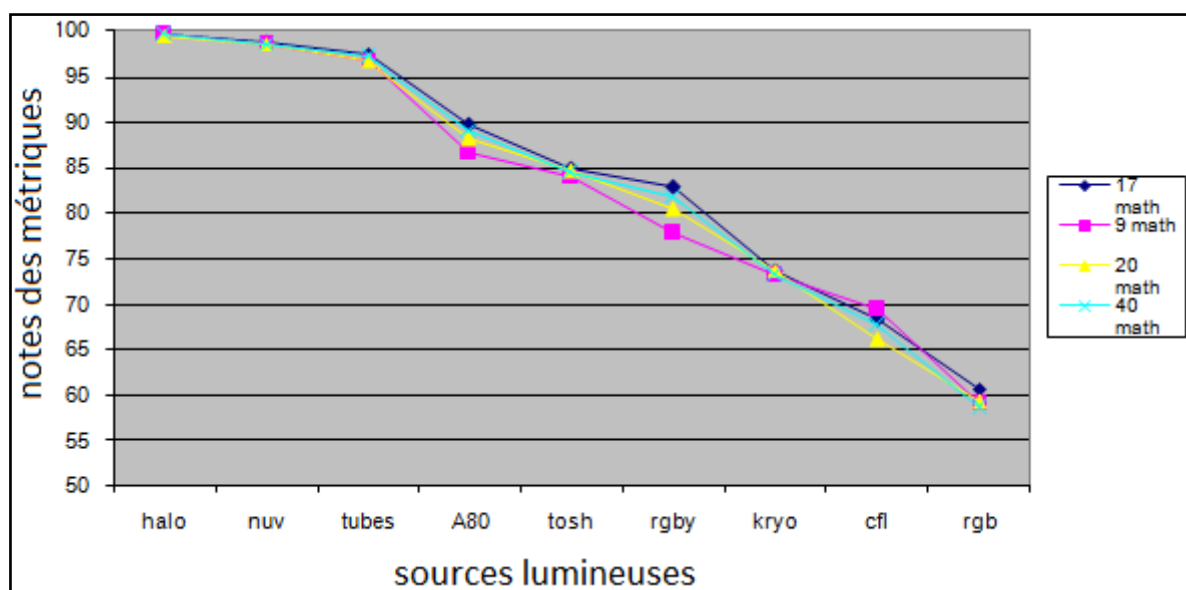


Figure 103 Classements des résultats du CRI2012 des jeux de 9, 17, 20 et 40 TCS

Ensuite, pour ces TCS, nous avons utilisé deux formes (Figure 104 ), la première (courbe verte) est issue des formules proposées par le CRI2012, la deuxième est une gaussienne (courbe bleue)

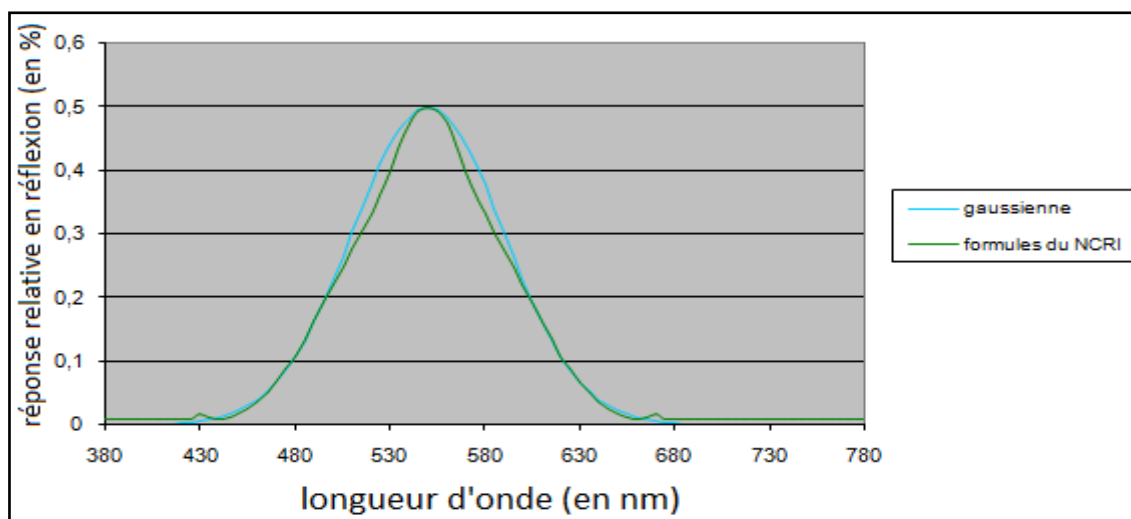


Figure 104 Gaussienne utilisée pour faciliter nos modélisations et la forme théorique.

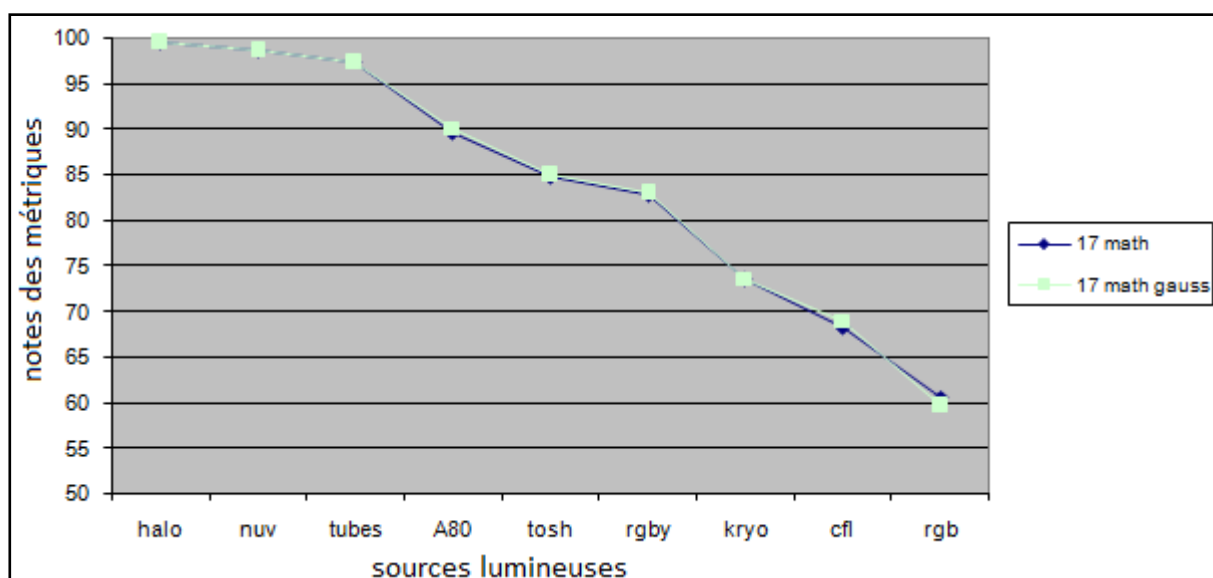


Figure 105 Comparaison entre le jeu de TCS théoriques et notre jeu de TCS utilisant la forme gaussienne

Les variations observées sont très minimales (Figure 105 ). Avec un écart maximum d'une unité, nous allons donc pouvoir utiliser la forme gaussienne, plus facile à mettre en place pour les recherches suivantes.

Ensuite, nous nous sommes intéressés à l'impact des variations de forme des TCS en faisant varier la largeur des courbes gaussiennes tout en gardant un nombre identique et un centrage en longueur d'onde identique.

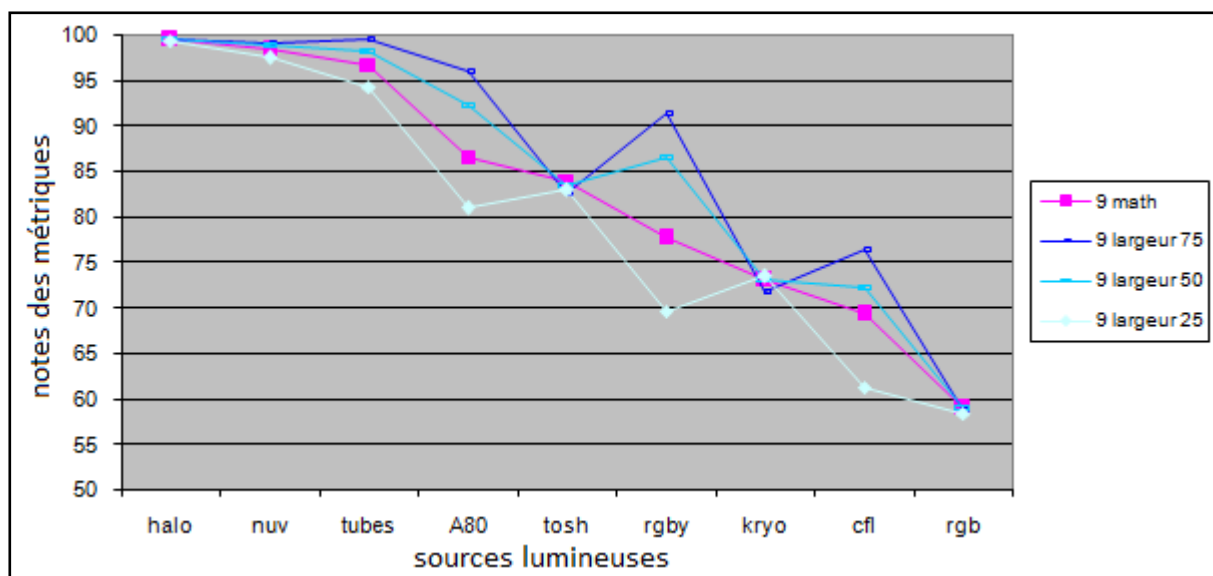


Figure 106 Impact des variations sur la largeur des gaussiennes

Sur la courbe précédente (Figure 106 ), nous pouvons observer que certaines solutions sont sensibles aux variations de la largeur des TCS alors que d'autres le sont peu. Ainsi on remarque que les solutions à DEL avec luminophore jaune (DEL WW + DEL CW) qui sont des solutions présentant peu de discontinuités dans leur spectre d'émission obtiennent des résultats peu dépendants de la largeur des TCS. En revanche, les solutions comme le RGBY, A80 et CFL qui présentent un spectre avec de plus fortes variations, obtiennent des résultats dépendants de la largeur des TCS.

Le RGB a peu de variations bien que son spectre soit composé de pics.

Nous allons maintenant garder la même largeur et faire varier la position des TCS d'un pas de 12.5nm (Figure 107 ):

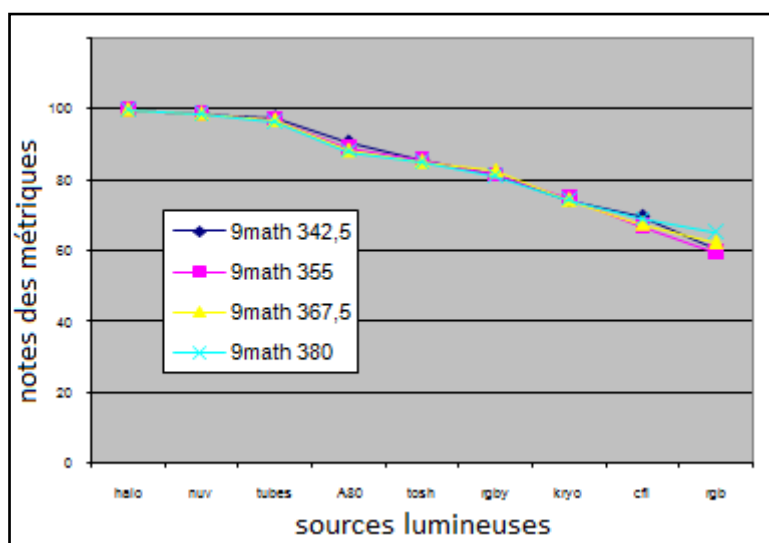


Figure 107      Impact du décalage des jeux de TCS

On peut voir que ce paramètre a globalement peu d'impact sur le résultat final. Seules quelques faibles variations sont à noter pour les solutions CFL, RGBY et RGB. Du fait de la nature des solutions et les lacunes qu'elles présentent dans certaines régions de leur spectre, il est aisé de comprendre que la cohésion entre la source et les TCS peut jouer sur leur évaluation.



Etude sur 122 spectres

Nous allons poursuivre notre investigation en utilisant la bande des 122 spectres introduite plus haut.

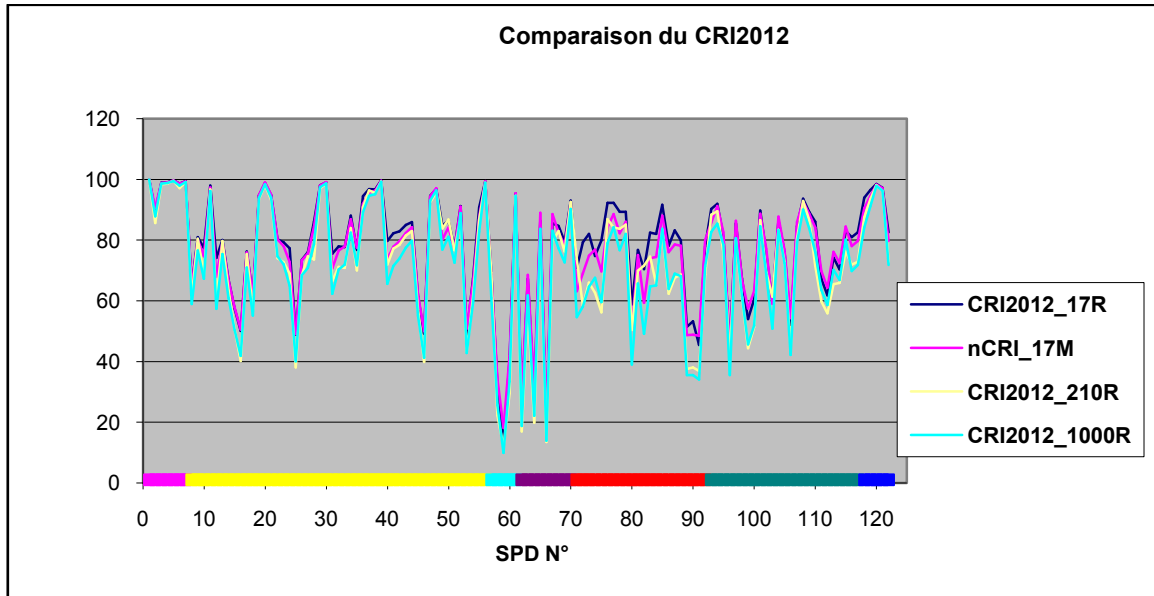


Figure 108 Comparaison du CRI2012 en fonction des jeux des TCS utilisés avec le facteur K d'origine

La courbe ci-dessus (Figure 108 ) montre les résultats obtenus avec les quatre types de TCS qu'offre la métrique du CRI2012, et les facteurs d'adaptation d'origine (pour les 17 mathématiques et 210 réels)

Etant donné qu'il y a quelques variations, nous avons recalculé les facteurs d'adaptation pour avoir une moyenne équivalente sur les F1 à F12 de la CIE ce qui donne la courbe suivante :

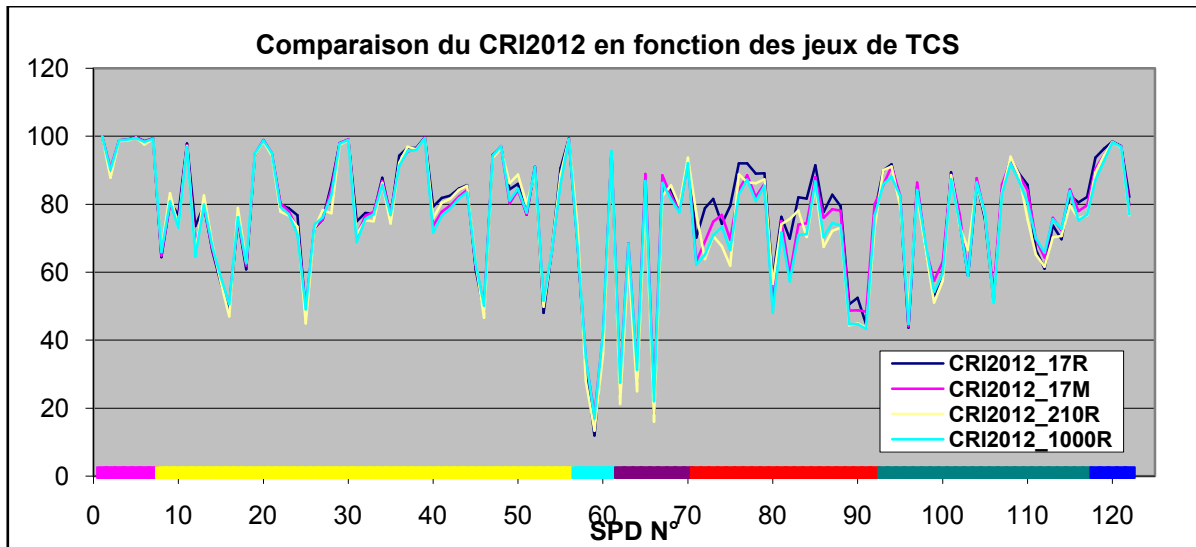


Figure 109 Comparaison du CRI2012 en fonction des jeux des TCS utilisés avec le facteur K recalculé

Sur cette courbe (Figure 109), comparativement à la précédente, les résultats obtenus ont un meilleur groupement. Néanmoins, les résultats des solutions à cluster de DEL obtiennent toujours une divergence notable dépassant parfois les 10 unités. On remarquera que pour ces solutions de type cluster, le nCRI\_17R obtient généralement la note supérieure alors que les nCRI\_210R et nCRI\_1000R les notes inférieures. Le nCRI\_17M se situe entre les deux, mais l'allure de la courbe est très proche du nCRI\_1000R.

On peut donc avancer l'hypothèse suivante : les 17 échantillons mathématiques ont un impact proche des 1000 échantillons réels, alors que les 210 échantillons réels peuvent avoir parfois un comportement différent. Quant aux 17 échantillons réels, ils présentent d'importants écarts sur les solutions cluster, mais fournissent des résultats très corrects avec les autres technologies.

En conclusion, l'utilisation des 17 échantillons mathématiques semble une bonne approche, tout en simplifiant le nombre de calculs à effectuer comparativement aux 1000 échantillons réels. L'utilisation des 17 échantillons réels semble, elle, à éviter, compte tenu de certains écarts de résultats que nous avons pu constater. De plus il n'y a aucun gain par rapport aux 17 échantillons mathématiques. L'intérêt des 210 échantillons est tangible, mais hormis quelques exceptions, le résultat est comparable à celui obtenu avec les 17 échantillons mathématiques ou aux 1000 échantillons réels. L'un des avantages de ces 210 échantillons est leur répartition dans l'espace LAB.

## L'impact du Gamut

Pour cette partie, nous avons défini un certain nombre d'indicateurs, pour nous aider à comprendre ce qui s'opérait lors de la compilation des métriques notamment pour les nouvelles méthodes de calcul ainsi nous nommerons :

« Espace » = distance minimale d'autres TCS dans l'espace colorimétrique, ainsi plus cette valeur est importante, plus les TCS utilisés vont être éloignés les uns des autres.

« Chroma » = valeur moyenne de la chromaticité des TCS, cette valeur est comparée à la valeur obtenue pour la source de référence.

« Contraste » = distance par rapport aux TCS de couleur « opposée » : pour chaque TCS un TCS opposé a été identifié, on calcule ensuite la distance entre ces deux TCS pour calculer la distance moyenne.

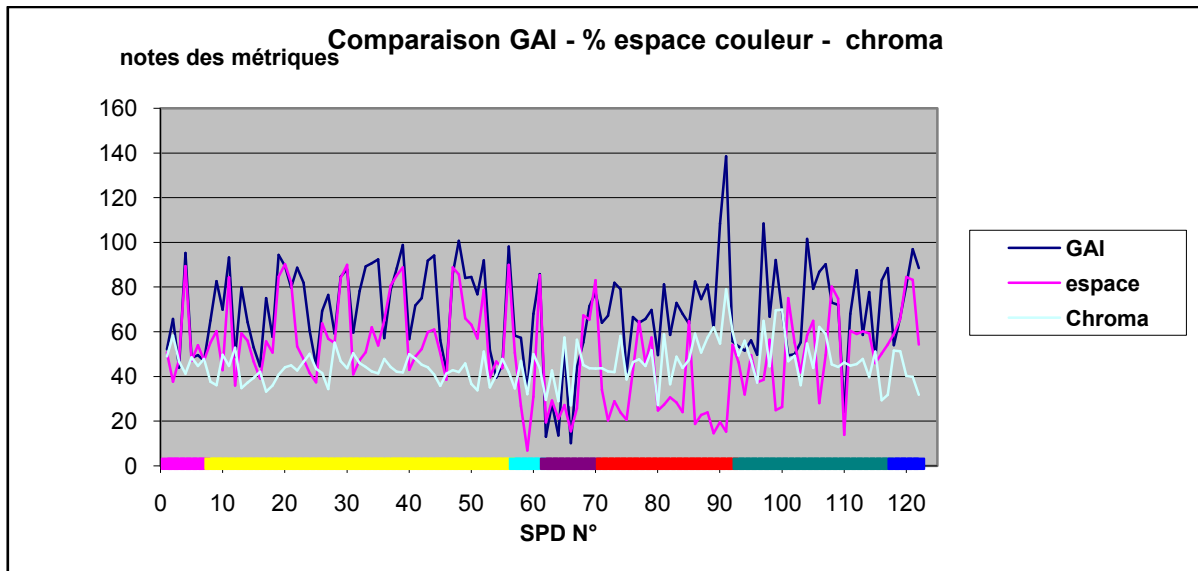


Figure 110 Comparaison du GAI, avec nos indicateurs de l'espace couleurs et de chroma

- Dans l'ensemble, on peut relever les éléments suivants sur la courbe ci-dessus (Figure 110) :
- La « Chroma » varie autour de valeurs plus faibles que la ligne nommée « Espace »
  - « Espace » subit grossièrement les mêmes types de variations que le GAI pour les clusters de DEL& PC DEL :
  - Sauf pour quelques solutions, la ligne « Espace » est bien en retrait. Donc, bien que ces solutions offrent plus de saturation, les couleurs occupent un espace plus faible.
  - Les valeurs moyennes de la chroma sont plus importantes. Nous démontrons ainsi que ces solutionsaturent davantage.

Pour les HPS & HAL:

-Le GIA et « l'espace » ont les mêmes variations.

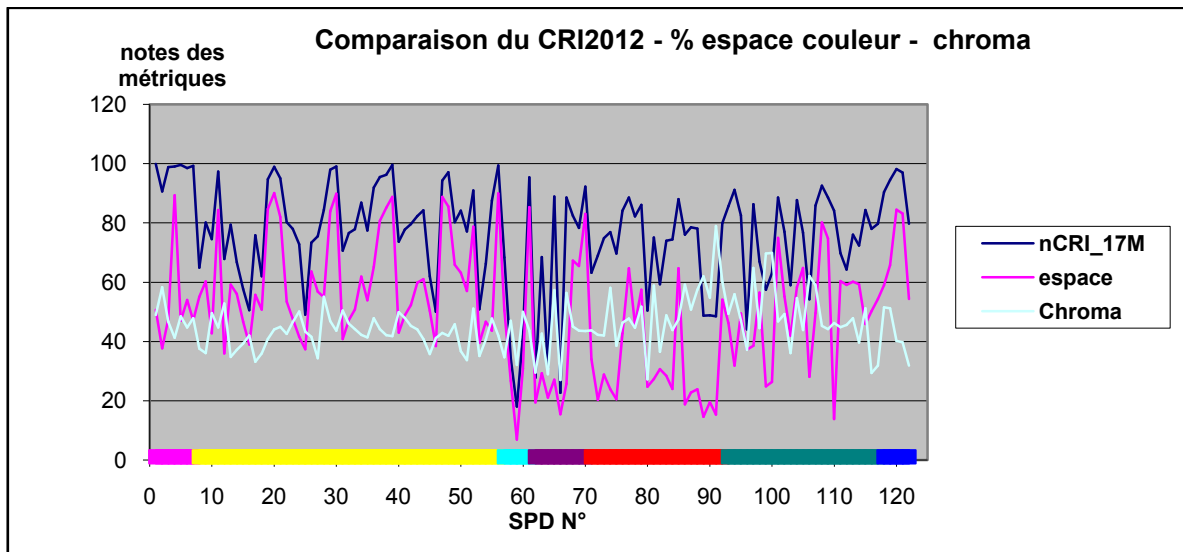


Figure 111 Comparaison du CRI2012, avec nos indicateurs de l'espace couleurs et de chroma

Nous observons les mêmes phénomènes que pour la courbe précédente (Figure 111) :

- La « Chroma » varie autour de valeurs plus faibles que « Espace »
- « Espace » subit grossièrement les mêmes types de variations que l'indice du GIA pour les clusters de DEL & PC DEL :
- Sauf pour quelques solutions, l'« Espace » est bien en retrait. Nous démontrons ainsi que ces solutions saturent davantage et les couleurs occupent donc un espace plus faible.

Pour les solutions FL :

- On a des variations de même type mais avec des amplitudes beaucoup plus fortes

Pour les HPS :

- Le CRI2012 obtient des variations plus fortes que la ligne « Espace ».

Pour les HAL :

- Le CRI2012 donne les notes maximum (car la référence est identique) et pourtant « l'espace » n'est pas plus grand pour autant.

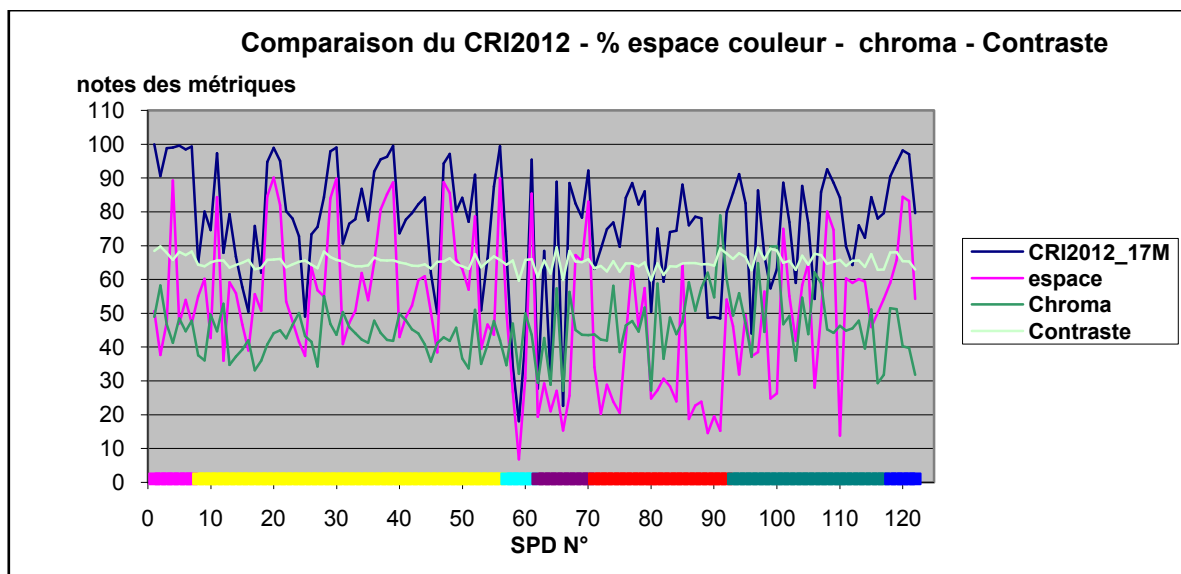


Figure 112 Comparaison du CRI2012, avec nos indicateurs de l'espace couleurs, de chroma et de contraste couleurs

Sur la courbes ci-dessus (Figure 112 ), la courbe « contraste » a encore moins de variations que le facteur de « chroma ».

Cependant, les solutions halogènes et quelques DEL PC ainsi que certaines HPS obtiennent des valeurs plus importantes que le reste des autres solutions.

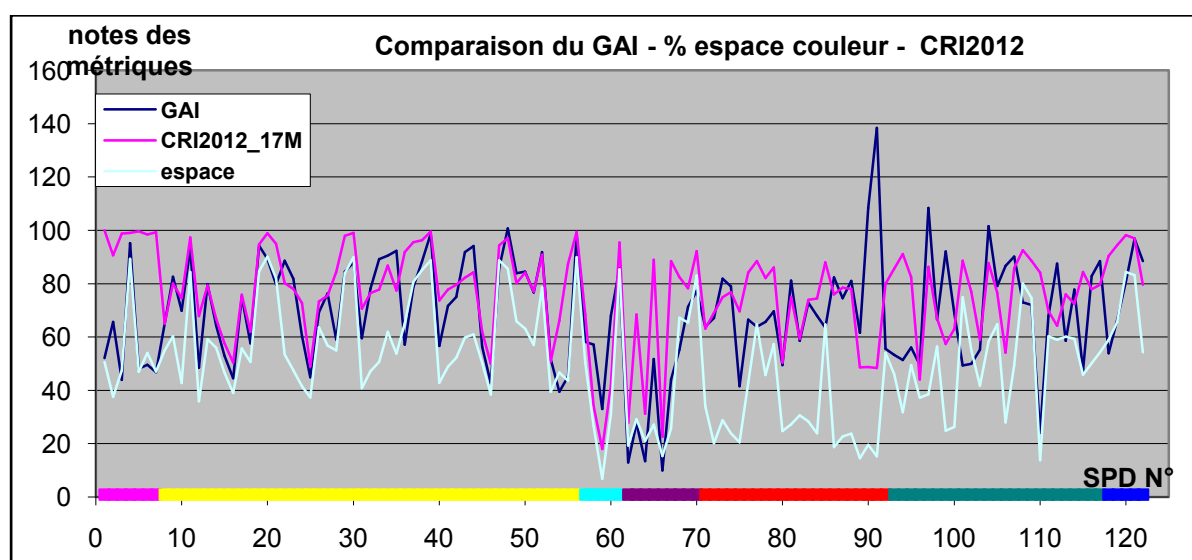


Figure 113 Comparaison du GAI, du CRI2012 et de notre indicateur de l'espace couleurs

- QTH/incandescent : on peut remarquer que le CRI2012 obtient des notes maximales car les références qu'il utilise possède un spectre proche des sources testées.

La dimension de l'espace colorimétrique est plus proche des résultats du GAI.

- Fluorescente : dans l'ensemble, le GAI et le CRI2012 obtiennent des résultats proches. La dimension de l'espace colorimétrique a plutôt l'allure du CRI2012 mais avec des valeurs bien plus faibles dans certain cas.

- HMI/Hg/Xe: GAI et CRI2012 et la dimension de « l'espace » colorimétrique suivent les mêmes tendances, avec des variations plus importantes que le GAI pour « l'espace » colorimétrique et moins importante pour le CRI2012.

- HPS: « l'espace colorimétrique » et le GAI coïncident bien. Le CRI2012 a de plus fortes variations.

- DEL clusters: les variations de « l'espace colorimétrique » sont bien que plus importantes (mais d'une valeur moyenne plus faible) ce qui semble correspondre davantage à la courbe du CRI2012

- DEL PC : Peu de correspondances peuvent être faites entre le CRI2012 GAI et « l'espace couleur ».

- DEL PC NUV : L'espace colorimétrique est proche des variations et des valeurs du CRI2012

De manière globale : « l'espace » semble un paramètre intéressant pour notre étude. En effet, en fonction des types de solutions, il varie plutôt comme le GAI ou le CRI2012, mais il a globalement des valeurs inférieures.

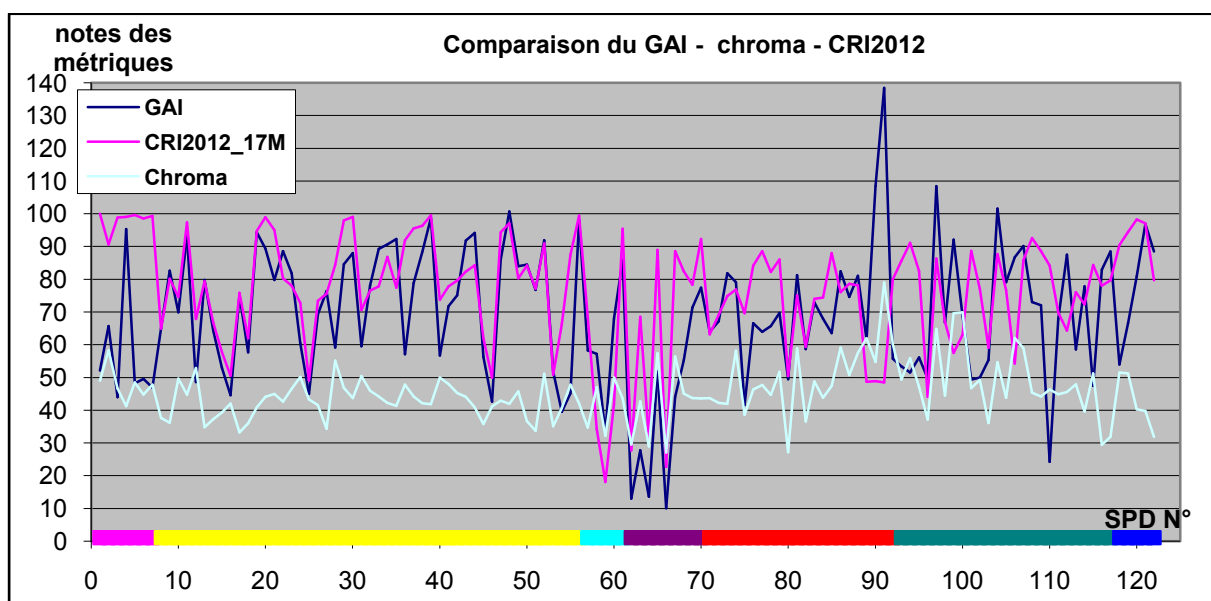


Figure 114 Comparaison du GAI, du CRI2012 et de notre indicateur de chroma

Dans l'ensemble, le paramètre de chromaticité calculé a des variations relativement faibles. Pourtant certaines variations fortes semblent avoir un retentissement sur ce facteur. Certaines solutions (QTH/incandescent DEL cluster/PC) obtiennent une meilleure notation.

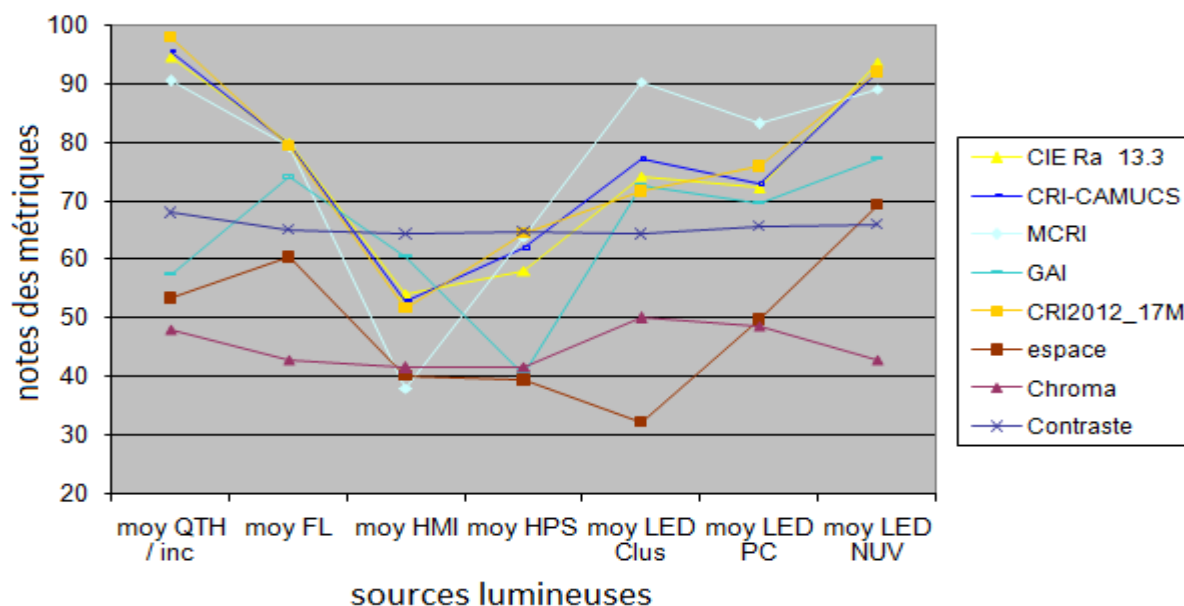


Figure 115 Moyenne des scores obtenus par type de solution et par méthode

Le graphique ci-dessus représente les valeurs moyennes (Figure 115 ) des différents indicateurs, par famille de technologie. On remarque que les CIE Ra, CRI-CAMUCS et CRI2012 ont des variations similaires. Le paramètre de contraste varie peu.

Concernant la « chroma », il est à noter que les solutions incandescentes, à DEL cluster et à DEL PC offrent davantage de contrastes.

Concernant l'espace des couleurs, celui-ci est plus important pour les solutions incandescentes fluorescentes, les DEL PC et les DEL NUV.

## Facteur d'adaptation« D »

### Variation du facteur d'adaptation « D »

Certaines métriques, laissent un degré de liberté quant au facteur d'adaptation. Ce facteur correspond à une valeur généralement comprise entre 0 et 1 pour caractériser la capacité supposée de l'œil à s'adapter visuellement à une scène lumineuse

Nous allons étudier dans cette partie l'impact des variations de ce paramètre en fonction des spectres relatifs. Bien que ce paramètre ait généralement une valeur recommandée, il sera intéressant de voir dans quel sens les résultats des métriques évoluent et à quelle vitesse.

Le tableau ci-dessous (Table 28 ) présente les différences globales maximales observées. Il fait ressortir deux choses. Premièrement, certaines sources sont plus susceptibles d'être impactées par ce paramètre tel que la DEL WW ou le fluo-compact, dont les variations sont importantes quelle que soit la métrique. D'autre part, certaines métriques sont globalement plus assujetties à des variations de résultats lorsque ce paramètre change tel que le CRI-CAM02 ou CRI00. Le MCRI a de très fortes variations. Nous aborderons cela plus en détail. Nous pouvons remarquer aussi que les variations peuvent être liées au jeu de TCS, tel qu'avec le CRI2012, où le résultat est très différent par rapport aux 210 TCS réels.

	CRI2012 MATH	17CRI2012 1000 REAL	CRI CAM02	CRI2012 MCRI	CRI2012 17REAL	CRI2012 210 REAL	CRI00	moyenne	écart type
halogène	1,00	1,91	5,42	94,19	1,49	3,05	5,05	2,99	1,87
Tubes	0,75	2,45	15,35	92,67	1,63	8,98	8,53	6,28	5,68
DEL WW	5,11	3,35	6,55	88,23	6,38	3,94	2,21	4,59	1,73
DEL WR	1,13	0,92	2,17	94,30	1,42	1,24	1,11	1,33	0,44
DEL RGBY	0,58	0,47	2,71	95,15	0,61	3,06	6,05	2,25	2,19
DEL RGB	0,63	0,20	0,33	66,36	0,64	0,23	4,38	1,07	1,63
DEL nuv	0,69	2,90	10,57	91,09	1,57	6,06	5,26	4,51	3,62
efl	3,42	5,10	4,56	82,96	1,13	6,77	7,19	4,70	2,24
DEL CW	0,52	0,34	5,43	69,68	0,64	0,98	7,40	2,55	3,06
moyenne	1,54	1,96	5,90	86,07	1,72	3,81	5,24	3,36	
écart type	1,62	1,66	4,59	10,93	1,80	2,94	2,42	1,75	

Table 28

Différences maximales observées sur les métriques par rapport aux technologies présentes dans l'expérience des couleurs



Variation du facteur « D » sur les sources de la pièce subjective:

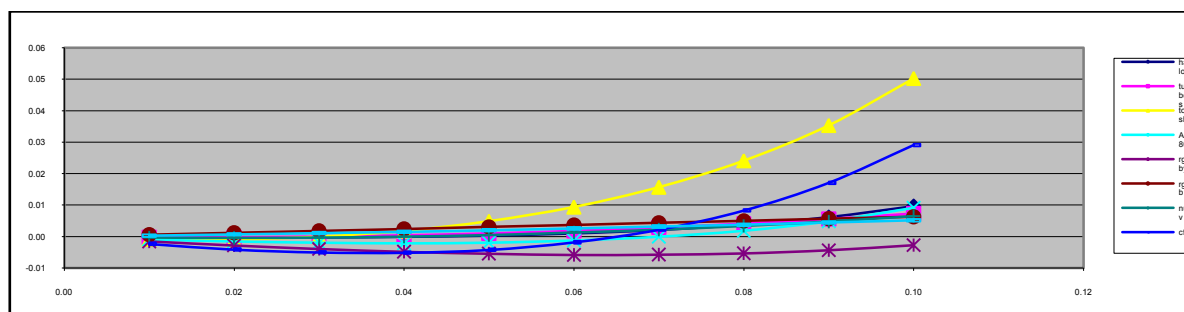


Figure 116 Variation du facteur « D » pour le CRI2012 avec 17 TCS mathématiques

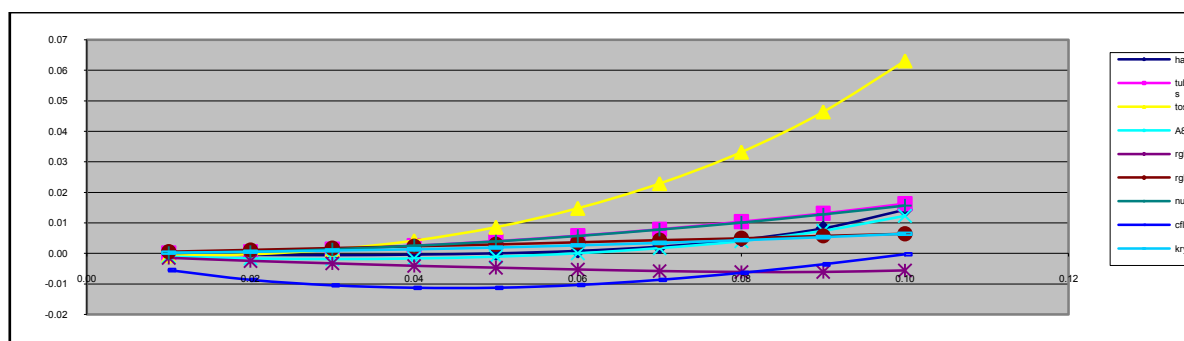


Figure 117 Variation du facteur « D » pour le CRI2012 avec 17 TCS réels

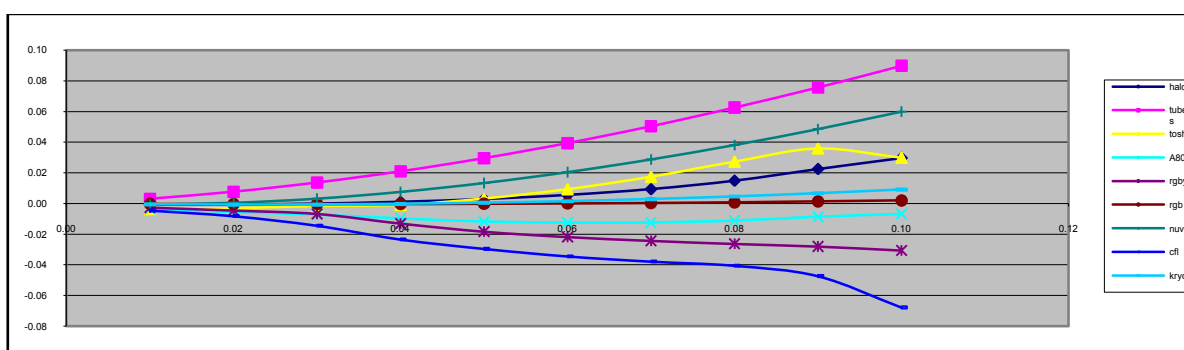


Figure 118 Variation du facteur « D » pour le CRI2012 avec 210 TCS réels

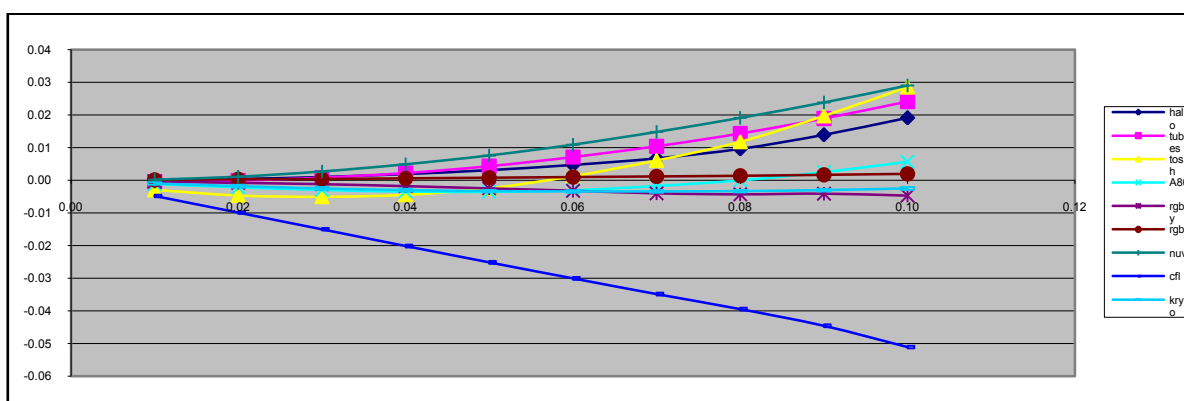


Figure 119 Variation du facteur « D » pour le CRI2012 avec 1000 TCS réels

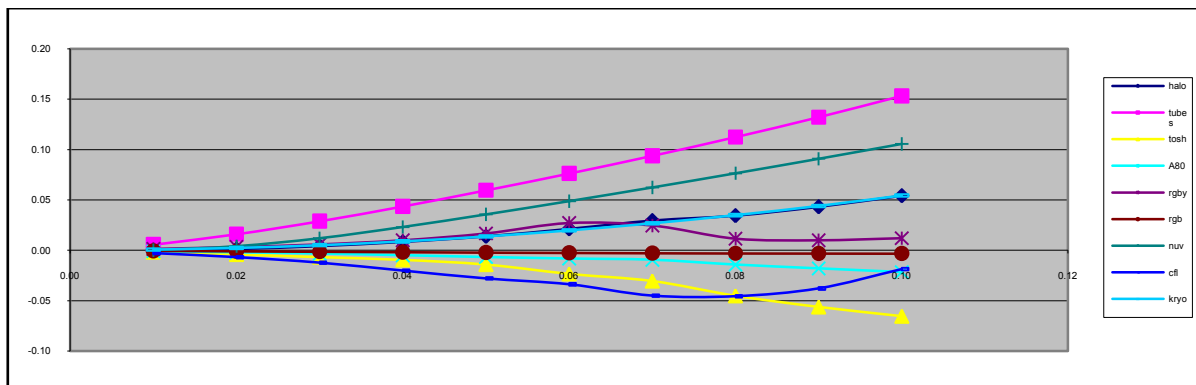


Figure 120 Variation du facteur « D » pour le CRICAM 02 UCS

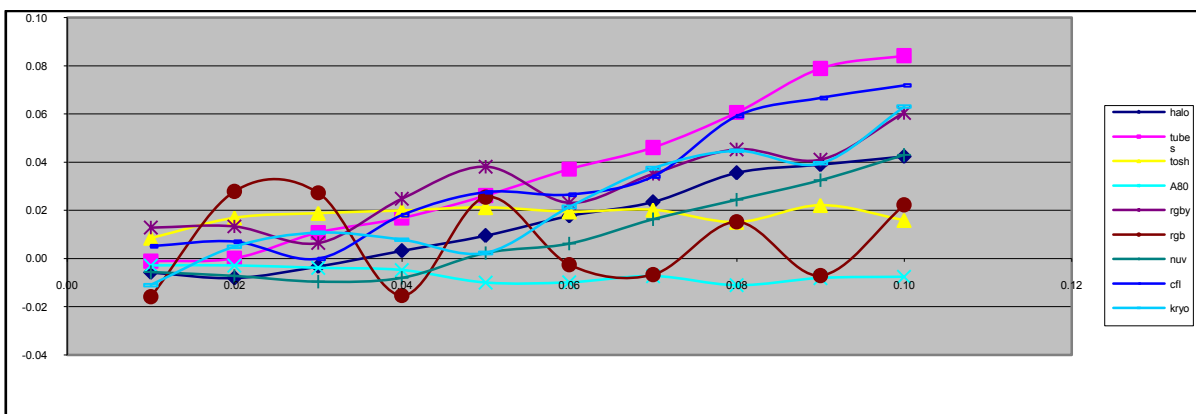


Figure 121 Variation du facteur « D » pour le CRI00

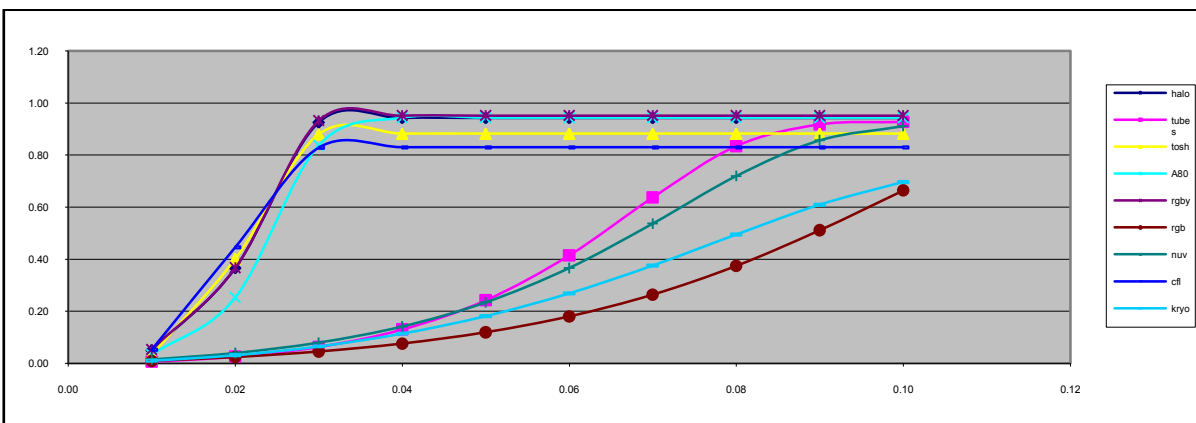


Figure 122 Variation du facteur « D » pour le MCRI

D'après les courbes ci-dessus (Figure 116 a la Figure 122 ):

Concernant le CRI2012 utilisant les jeux de 17 TCS réels et les 17 TCS mathématiques, les variations ont une allure exponentielle avec une différence d'environ six unités au maximum (Toshiba / WW)

Les deux autres jeux de 210 et 1000 TCS réels procurent une allure plus rectiligne. Les différences maximales restent inférieures à la dizaine, mais l'observation montre que certaines solutions ont une pente négative (CFL).

Les variations observées sur le CRICAM 02 sont du même type mais avec une amplitude plus forte : 15 unités de différences au maximum.

Sur le CRI00, on observe dans plusieurs cas des oscillations de petites amplitudes (~5unités) (RGB/ cluster de DEL)

- Des croissances rectilignes (Toshiba / WW)
- Des variations faibles voire quasi nulles (Kryona / CW)

Concernant le MCRI, on peut remarquer une très forte décroissance pour les solutions de faibles CCT, alors que les solutions de CCT plus importantes décroissent moins rapidement.

Le facteur d'adaptation a un très fort impact sur cette métrique.

Variation du facteur « D » sur des corps noirs idéaux :

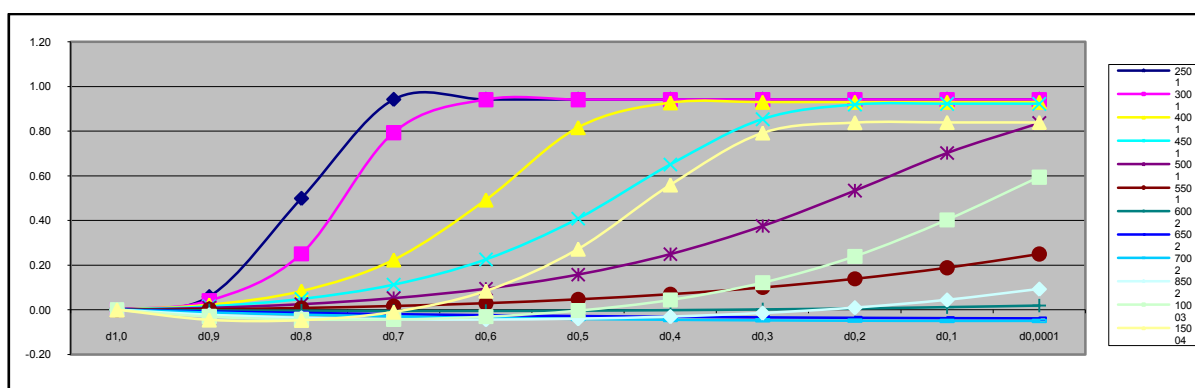


Figure 123 Variations des résultats du MCRI en fonction de la CCT d'un corps noir

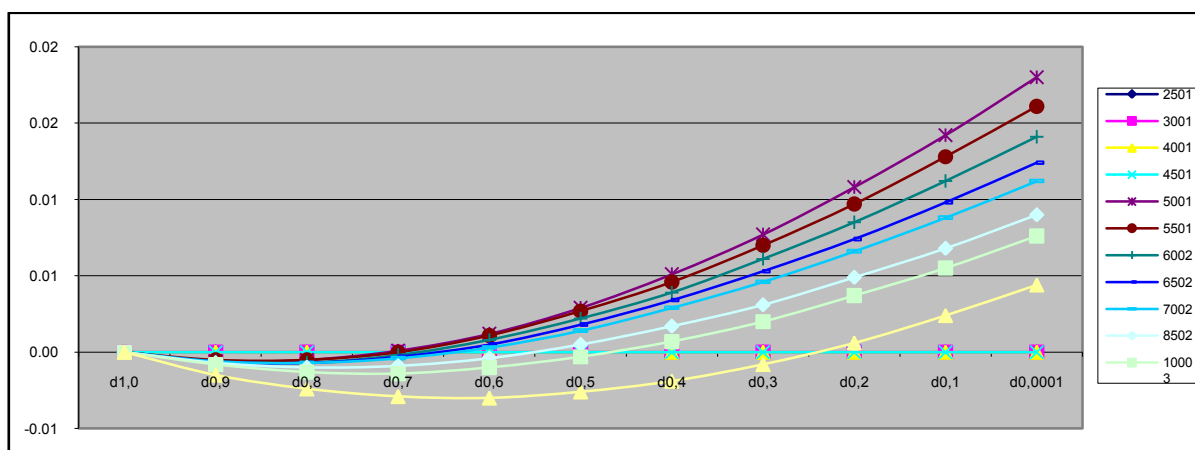


Figure 124 Variations des résultats du CRI2012\_17M en fonction de la CCT d'un corps noir

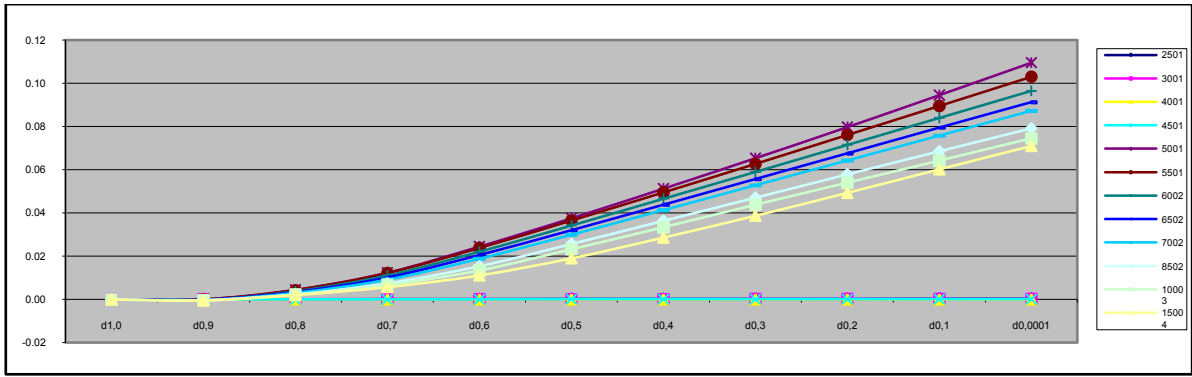


Figure 125 Variations des résultats du CRICAM en fonction de la CCT d'un corps noir

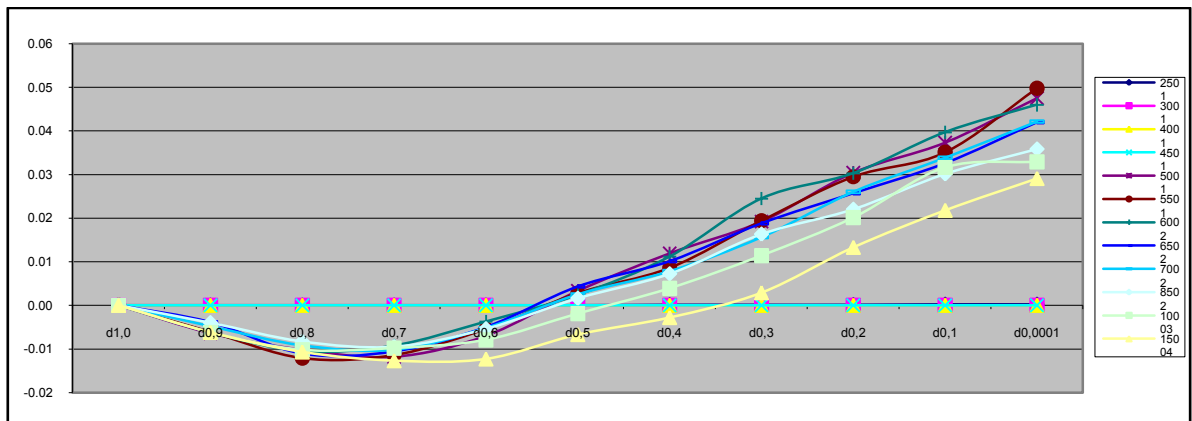


Figure 126 Variations des résultats du CRI00 en fonction de la CCT d'un corps noir

Pour le CRI00 (Figure 126 ), le CRICAM (Figure 125 ) et le CRI2012 (Figure 124 ) on note une dépendance faible de la température de couleur. En effet, les courbes ont une allure semblable et les variations entre elles sont faibles. On peut cependant remarquer que les courbes de faibles températures de couleur ont une variation nulle du fait du choix d'une référence similaire.

Concernant le MCRI (Figure 123 ), on observe une forte dépendance du facteur d'adaptation avec la température de couleur associée à la source. Pour les CCT avoisinant les 6500K - 7000K, il y a peu de variations lorsque le facteur d'adaptation évolue, alors que, plus la CCT s'éloigne de ces valeurs, plus des différences apparaissent lors de la variation du facteur d'adaptation. Les solutions, dans ces plages de température, sont probablement sur-notées

### Choix de la source de référence

Dans la majorité des métriques présentées dans ce document, la méthodologie consiste à comparer la source à tester avec une source de référence. L'une des principales questions repose sur la détermination du choix de cette référence. De plus, il est important de rappeler

qu'en fonction de la grandeur que l'on souhaite mesurer (i.e. indice de fidélité *Versus* préférence) la source de référence ne devra peut-être pas s'orienter vers le même type de source.

Dans un premier temps, nous avons calculé les variations qui s'opèrent lorsque nous changeons les illuminants de référence tels qu'ils sont définis dans les métriques. Cette analyse a montré qu'il était nécessaire d'avoir une température de couleur proximale proche de la source à évaluer. Cette évidence nous a conduits à ne pas poursuivre cette piste.

Afin de vérifier si les sources de référence étaient sélectionnées de façon adéquate il aurait été nécessaire de mener une expérience subjective complémentaire en faisant évaluer un grand nombre de sources pour chaque température de couleurs.

Toutefois, avec nos données subjectives, nous remarquons que pour les températures de couleurs chaudes, l'halogène a la préférence des panelistes. Or, cette solution a un spectre quasi similaire au spectre du corps noir utilisé comme référence par la CIE. Le prendre en référence semble congruent.

Pour les sources froides, nous n'avons pas présenté l'illuminant de référence correspondant (D55). Néanmoins, la métrique de la CIE obtient de bonnes corrélations avec les sources froides présentées. Il conviendrait de l'inclure dans d'autres expériences subjectives complémentaires en vue de confirmer cette référence et éventuellement de la répliquer auprès d'autres cultures.

Bien que ces remarques appellent d'autres expériences s'intéressant de manière plus fine à cette problématique, nous avons considéré que la définition de la source de référence de la CIE aboutit à des résultats cohérents pour notre étude.

## Développement d'un indice:

### Recommandation fidélité

Nous avons pu voir dans les parties précédentes que certains paramètres avaient plus d'impact que d'autres. Par exemple, le facteur d'adaptation  $D$  a peu d'influence, hormis dans le cas du MCRI. Les TCS sélectionnés ont un impact direct de par leur nombre et de par leur nature (réelle ou mathématique), ce qui peut paraître normal, car les métriques comparent les écarts colorimétriques sur ces TCS : ainsi un jeu saturé, a des résultats bien différents d'un jeu peu saturé. D'autre part, si un jeu a des échantillons métamériques, les résultats en sont affectés. Enfin, si leur nombre est trop faible, certaines teintes de couleurs peuvent être mal évaluées ; si leur nombre est trop important, un écart discriminant risque d'être moyenné parmi les autres écarts. D'autres éléments comme le type de moyenne effectuée sur les écarts colorimétriques permettent de mieux définir l'échelle sans en influencer l'ordre. Enfin le rôle de la référence est primordial, mais il est difficile à définir pour les sources chaudes.

Compte tenu de ces constatations, il est apparu important d'effectuer des développements concernant les jeux de TCS. En effet, le récent développement du jeu de TCS mathématiques du CRI2012 fournit des résultats intéressants. Cependant la répartition de ces TCS dans un espace colorimétrique met en évidence que bien qu'ils représentent l'ensemble du spectre visible, ces TCS ne permettent pas d'évaluer l'ensemble des couleurs et notamment les couleurs composées telles que les pourpres et les teintes rosées.

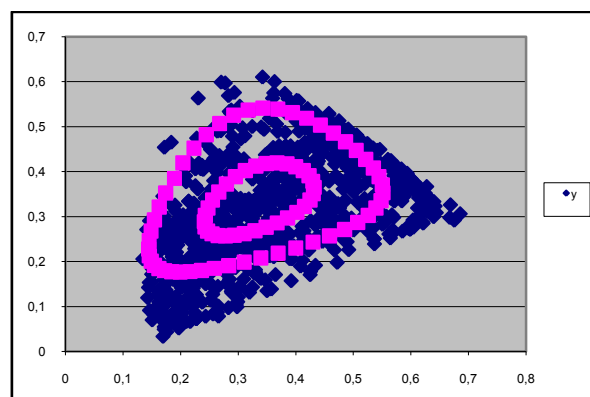


Figure 127 Répartition dans l'espace xy des 80 TCS mathématiques sur deux disques (rose) et des 1000 échantillons réels du CRI2012 (bleu)

Nous avons donc développé un ensemble de jeu de TCS à partir de fonctions mathématiques uniformément réparties dans un espace  $L^*a^*b^*$ . Nous avons fait le choix d'en avoir 80 réparties en deux groupes de saturation. Tous les TCS ont une réponse en luminance proche.

Pour développer ce jeu de TCS, nous avons, d'une part, effectué un programme effectuant des transitions de type sigmoïde (jusqu'à deux), à différentes longueurs d'onde, pour différentes largeurs de transition et à différentes valeurs de réflexion. D'autre part, nous avons effectué des fonctions gaussiennes à différentes longueurs d'onde (jusqu'à deux) de différentes largeurs et hauteurs ainsi que leurs inverses.

L'ensemble de ces TCS (Figure 128 ) a été encadré afin qu'il reste des solutions physiquement possibles : ainsi la valeur de réflexion ne peut pas dépasser 100% et n'est pas inférieure à 0%.

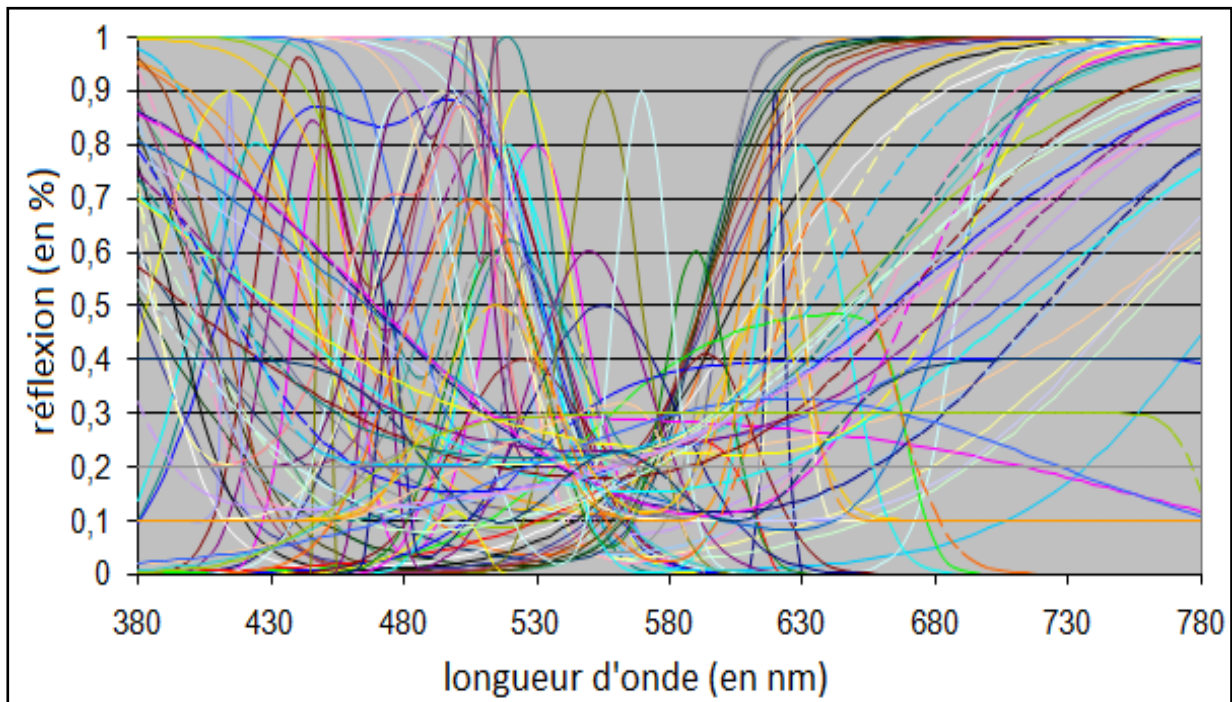


Figure 128      Jeu développé de TCS mathématiques

Les graphiques suivants (Figure 129 à la Figure 136 ) présentent plus en détails les TCS par régions de couleur et leur saturation.

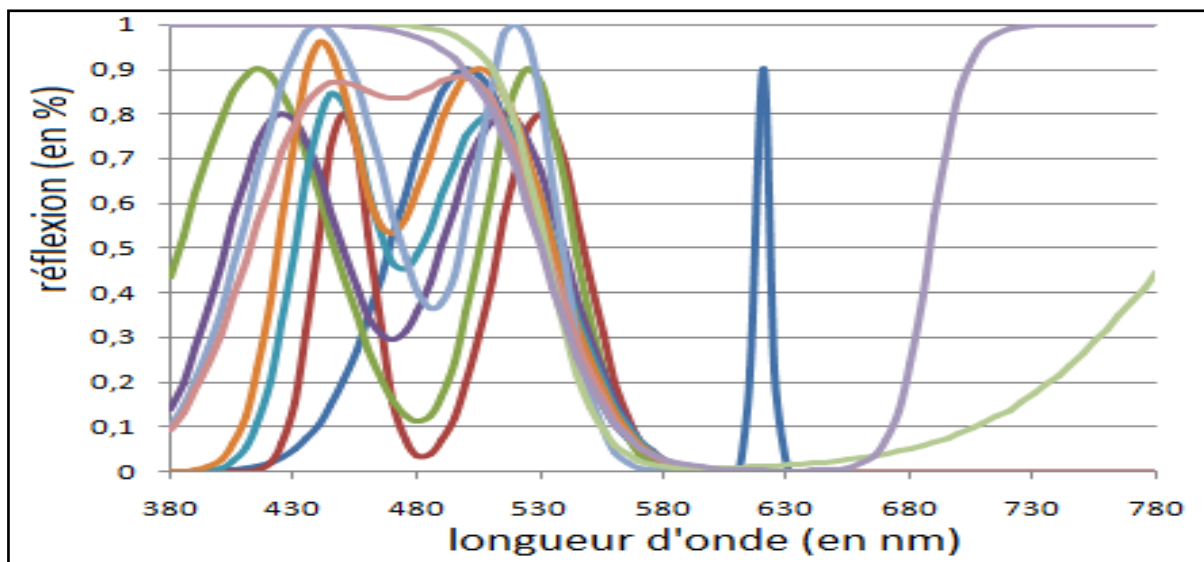


Figure 129 Bleu saturé

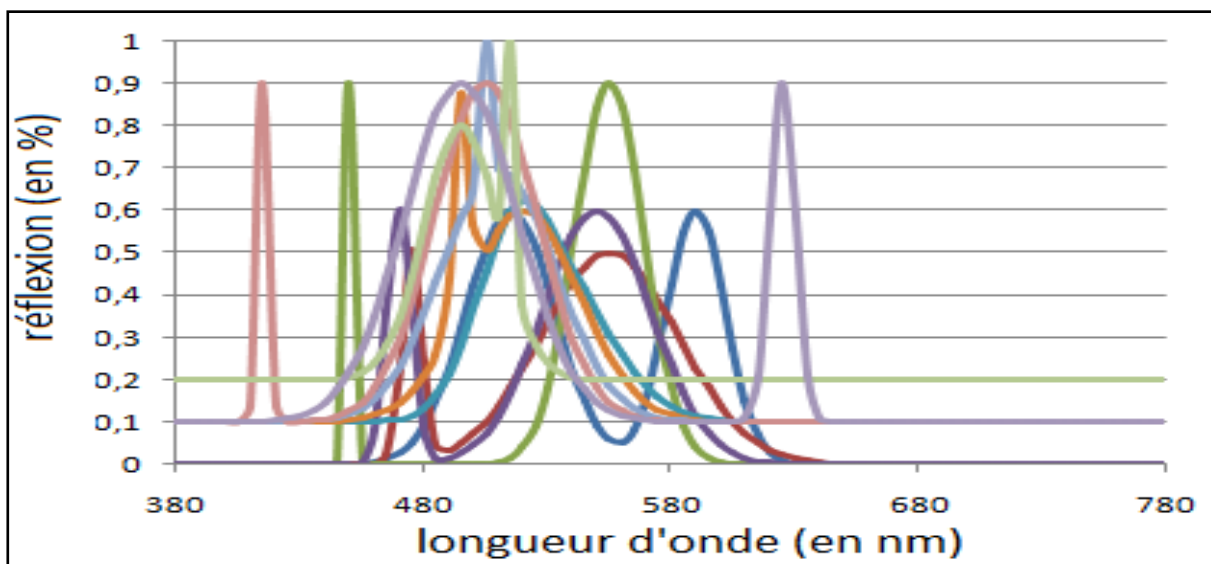


Figure 130 Bleu peu saturé



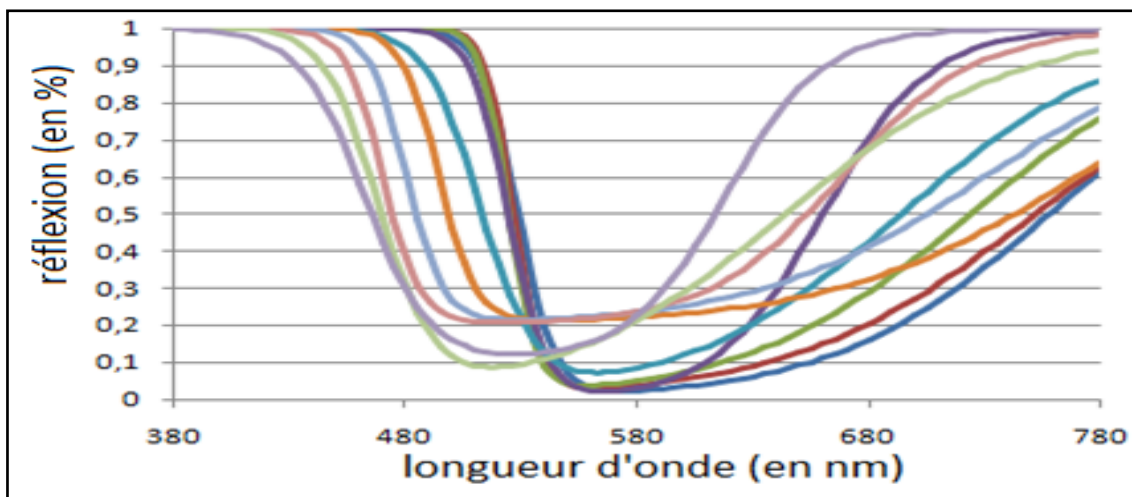


Figure 131 Pourpre saturé

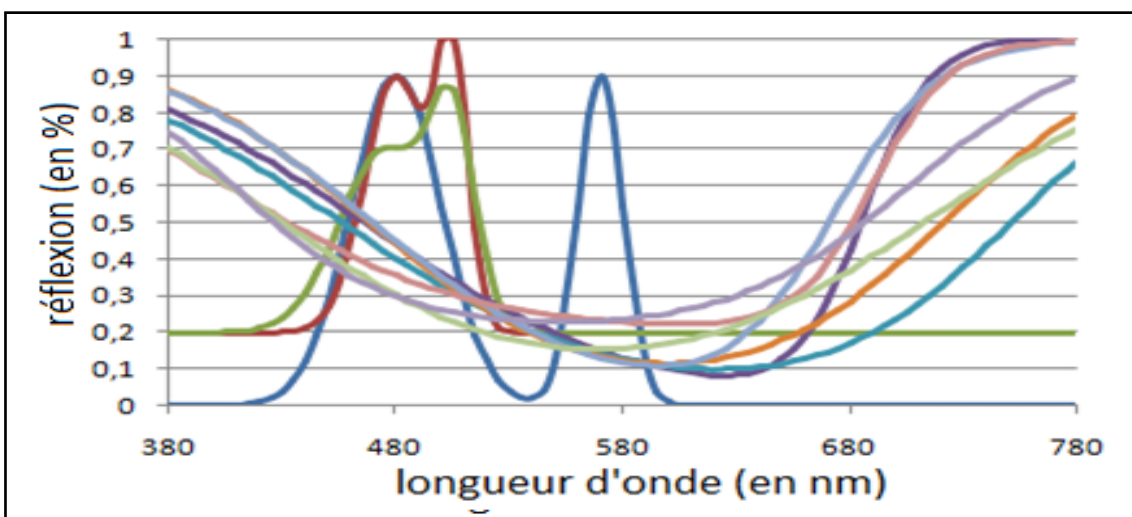


Figure 132 Pourpre non saturé

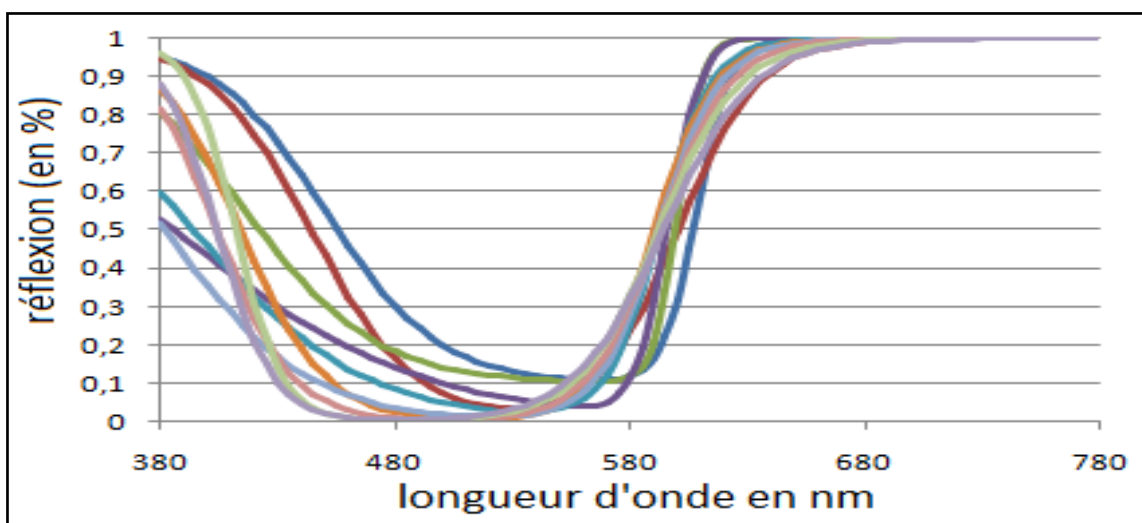


Figure 133 Rouge saturé

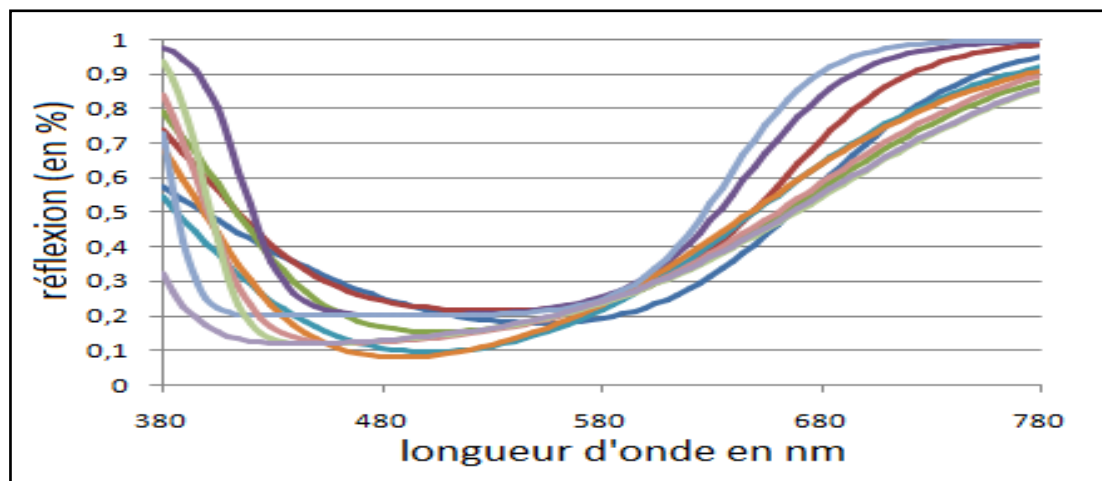


Figure 134 Rouge peu saturé

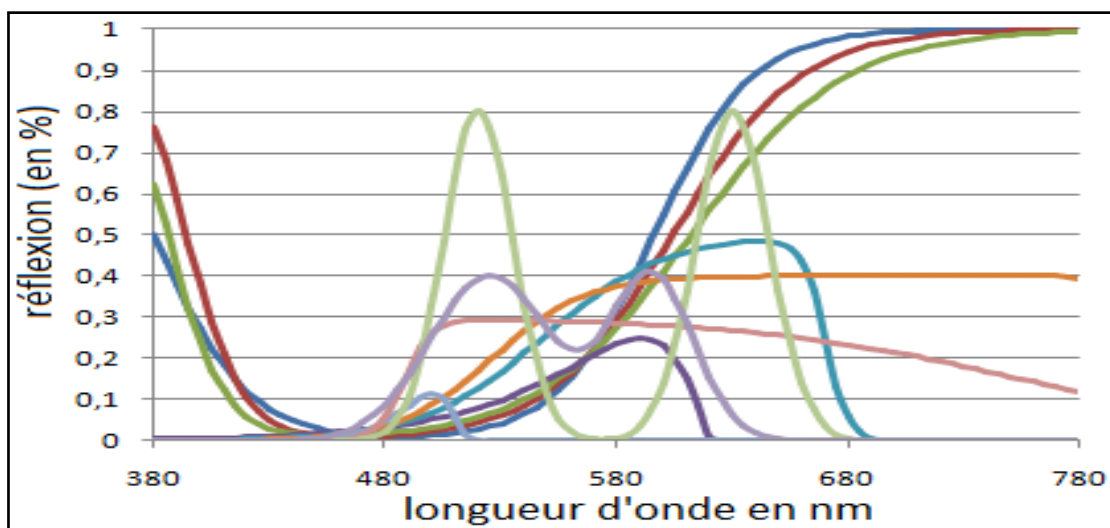


Figure 135 Vert saturé

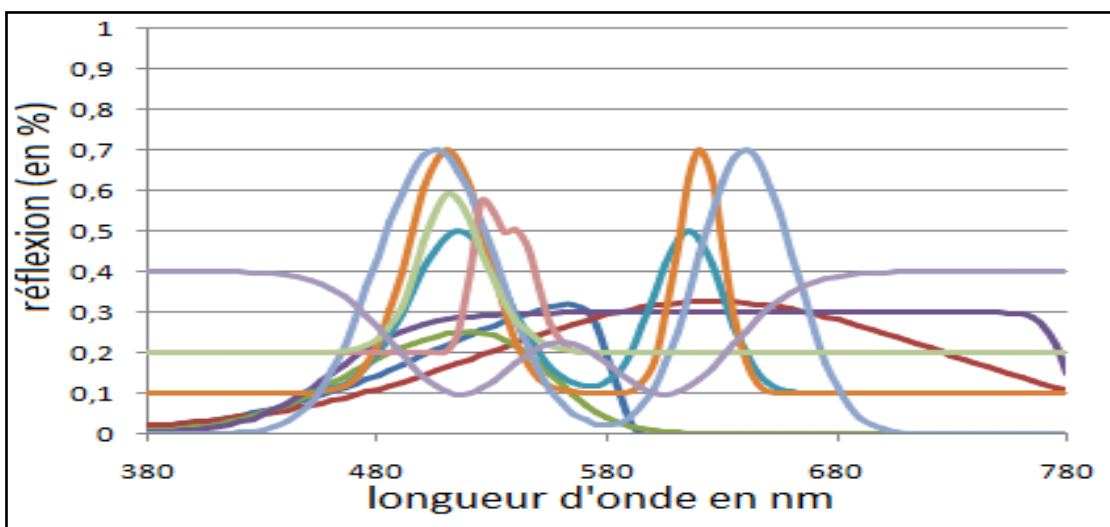


Figure 136 Vert peu saturé

Le graphique ci-dessous (Figure 137 ) représente la distribution relative de l'ensemble des TCS. On peut observer que cette courbe comporte des transitions douces. Il est important de noter qu'il n'y a pas de régions délaissées. On peut remarquer un creux dans la zone des longueurs d'onde vertes ce qui laisserait à penser que cette courbe est inversement proportionnelle à la réponse photopique de l'œil. Compte tenu que le meilleur rendement énergétique est obtenu par les longueurs d'onde de cette région, celle-ci ne sera pas délaissée par les fabricants qui souhaitent proposer des solutions de bonne qualité associant un bon rendement énergétique.

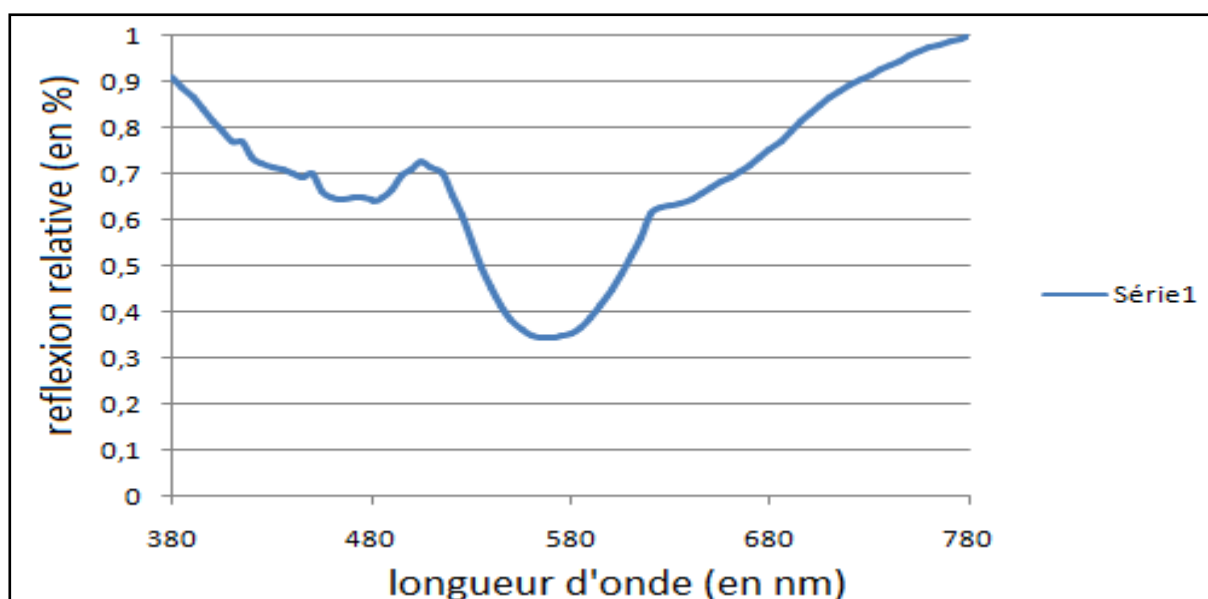


Figure 137 Distribution de l'ensemble des TCS en fonction des longueurs d'onde

A partir de l'ensemble de ces fonctions, les coordonnées colorimétriques ont été calculées et nous avons sélectionné les fonctions fournissant les coordonnées les plus proches des coordonnées préalablement sélectionnées.

Ces TCS ont été introduits dans la métrique du CRI2012 (Figure 138 ) ; après avoir ajusté le facteur d'adaptation à l'aide des illuminants F1 à F12 de la CIE, nous avons étudié les résultats que fournissent ces TCS en utilisant les distributions spectrales des luminaires présents dans la pièce subjective et ceux présents dans la bande des 122 spectres précédemment utilisés.

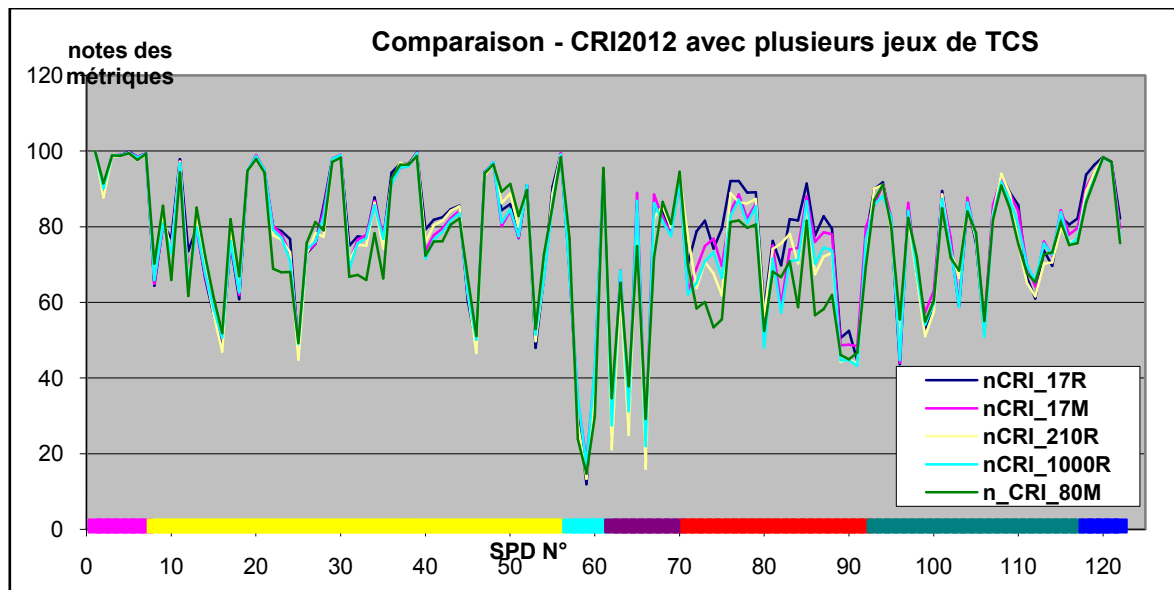


Figure 138 Comparaison du CRI2012 en fonction des jeux de TCS

Les figures ci-dessous (Figure 139 ) présente les écarts colorimétriques dans l'espace  $La^*b^*$  pour la source LED WW (à gauche) et la source RGB (à droite). On remarque que les écarts sont plus importants avec la solution RGB.

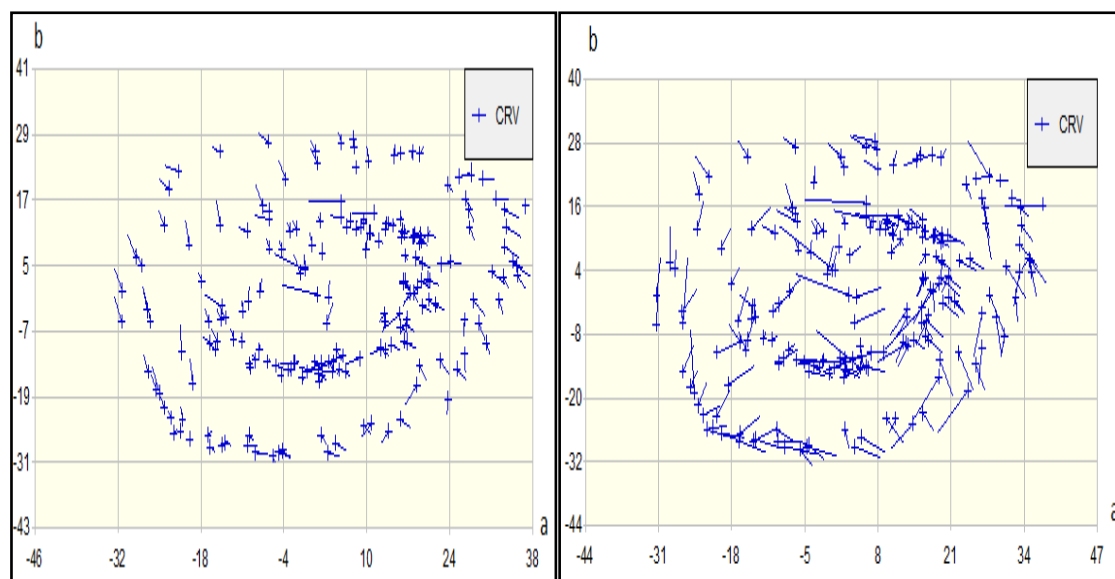


Figure 139 Ecarts colorimétriques observés des 80 TCS mathématiques (à gauche WW, à droite RGB)

Pour conclure sur le développement de cet indice, nous avons calculé les coefficients de corrélation de Pearson entre les métriques et les données subjectives (Table 29 ). Ces

coefficients ont été calculés en prenant en considération, respectivement l'ensemble des sources présentes dans notre expérience subjective, les sources froides, les sources chaudes, les LED, les LED froides ou les LED chaudes. Nous avons vu précédemment que les métriques existantes posaient problème pour les sources LED chaudes. (Hormis le MCRI) Le jeu de 80 TCS développé est performant dans cette situation. Cependant il présente des difficultés à prédire la qualité des sources chaudes. Pour les sources froides (toutes ou spécifiquement à LED) il est comparable au trio CRI CQS ou CRI-CAMUCS qui sont des métriques pertinentes pour ce type de source. Si cet indice paraît légèrement inférieur concernant le coefficient de "toutes les sources", il reste un bon élément de prédiction pour les sources LED tout en apportant une analyse élargie à l'ensemble des couleurs comparativement au CRI 2012 17M.

Métriques	Toutes les sources	Les sources froides	Les sources chaudes	Les DEL	Les LED Froides	Les LED chaudes
CRI 2012 80 math	0,660	0,980	0,075	0,917	0,976	0,952
CRI 2012 17 math	0,689	0,946	-0,005	0,930	0,939	-0,531
CRI Ra	0,912	0,998	0,576	0,923	0,998	-0,044
CQS Qa	0,762	0,961	0,581	0,839	0,948	0,500
MCRI	0,130	0,016	0,235	0,162	-0,159	0,991
CRI-CAMUCS	0,862	0,996	0,634	0,921	0,996	0,596
RCRI	0,783	0,894	0,602	0,842	0,860	0,725
GAI	-0,761	-0,690	0,006	-0,797	-0,757	0,945

Table 29 Coefficients de corrélation de Pearson entre les métriques et les données subjectives

## Conclusion sur le rendu des couleurs

Concernant l'indice de fidélité, nous sommes partis de la dernière proposition de la CIE (CRI2012) à partir de laquelle nous avons réalisé un nouveau jeu de 80 échantillons mathématiques. Ces derniers sont répartis uniformément sur deux cercles dans l'espace colorimétrique  $La^*b^*$ . Cette proposition améliore les corrélations entre notre expérience subjective et les résultats de la métrique.

Concernant la préférence des utilisateurs, nous avons remarqué que les indices de fidélité agissent correctement pour les sources de température de couleur froide (supérieure à 4000K) car ces sources présentent une palette de couleurs riche et équilibrée. De plus, la source de référence proche de la lumière du jour répond à des références visuelles universelles évidentes.

En revanche, concernant le MCRI, certains problèmes apparaissent, par exemple dans le cas de la carotte rouge. Ils sont liés à l'implémentation de la métrique et de ses fonctions de similarité liées aux objets.

Pour les sources chaudes, les métriques les plus récentes donnent une meilleure prédiction. Le CRI-CAMUCS et CRI2012 sont les plus performantes. Cependant, toutes les métriques déclassent les sources fluorescentes.

Le MCRI, quant à lui, fonctionne bien pour les DEL chaudes car il a tendance à fournir de meilleures notes pour les sources présentant des saturations.

Un des problèmes des métriques de fidélité est l'utilisation de sources de références proches des spectres des sources halogènes. Elles ne reflètent pas la même qualité que d'autres sources utilisées dans l'expérience subjective toutes aussi appréciées. La raison semble être la faible discrimination de certaines couleurs et la faible étendue de la palette des couleurs lorsque l'éclairage est chaud.

Pour les sources chaudes, l'utilisation de plusieurs métriques basées sur des aspects qualitatifs différents (fidélité, gamut) semble une approche fournissant un résultat plus complet mais ce dernier nécessite des compétences spécifiques pour une analyse difficile à mettre en place pour définir un indice général accessible au grand public.

# Confort

Comme nous avons pu le constater dans le deuxième chapitre, le confort visuel est très difficile à définir. L'appréciation de la qualité visuelle d'un environnement lumineux fait appel à de nombreuses dimensions perceptives. Selon les configurations des sources lumineuses, il est plus facile d'évaluer les sources d'inconfort que de déterminer ce qui a une influence sur la perception des caractéristiques lumineuses d'un espace éclairé artificiellement.

Ainsi, selon la configuration lumineuse, l'identification des problèmes tels que l'éblouissement, le papillotement ou un mauvais rendu des couleurs sera facilement identifiable alors que les aspects relatifs à l'environnement lumineux (sources apparentes, sources trop directives,...) et l'évaluation du confort visuel dans son ensemble sont difficiles à prédire.

Comme mentionné dans le deuxième chapitre, seules quelques métriques existent et évaluent des sources d'inconfort particulières tel que l'éblouissement. Or le confort visuel n'est pas uniquement déterminé par les sources d'inconfort. Il est une combinaison des sources d'inconfort, et des sources de confort comme (i) de l'environnement lumineux et physique, (ii) le rendu des couleurs, (iii) la distribution.

Aucune métrique publiée n'est capable de prédire le confort perçu par un observateur dans une configuration donnée. Nous faisons l'hypothèse que le confort est lié aux sources d'inconfort, mais aussi d'un certain nombre de paramètres. Par contre la composition de ces paramètres dépend de la nature de l'environnement (espace public, bureau, domestique)

Dans l'optique de pouvoir comparer nos résultats à ceux des études passées, nous allons tout d'abord rendre compte des valeurs métriques d'inconfort existantes, et plus particulièrement celles dues à l'éblouissement. Grâce à de nouveaux dispositifs permettant de traiter un grand nombre de situations lumineuses, nous présenterons une nouvelle approche que nous avons développée en interne capable d'évaluer le confort visuel.

## Réalisation du modèle de confort visuel

Nous avons conçu un modèle permettant de déterminer le confort visuel d'une configuration à partir de mesures physiques. Les paramètres d'entrée sont de deux natures, les paramètres d'inconfort et ceux de confort. Notre modèle est fondé sur le principe suivant : en fonction du degré de présence des paramètres d'inconfort, nous prenons en compte les paramètres de confort. Nous avons choisi de faire de la sorte, car une configuration présentant de fortes sources d'inconfort, ne pourra pas être agréable. En revanche si une configuration présente peu d'éléments inconfortables, seuls les paramètres de confort permettent de déterminer si elle l'est effectivement.

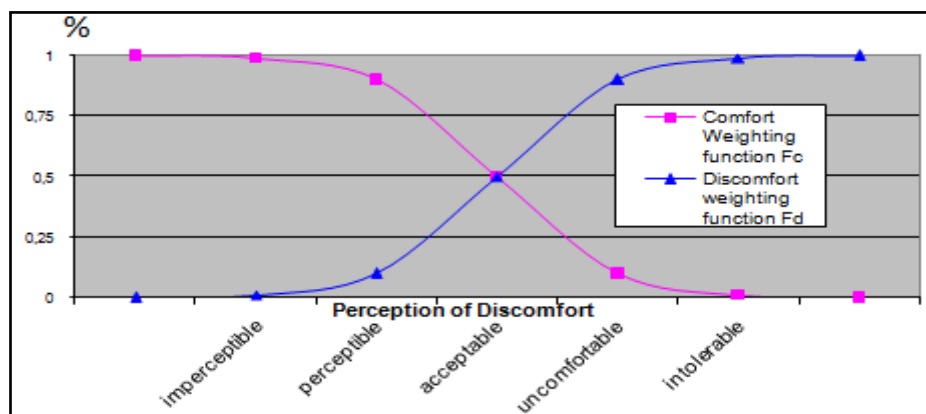
Par les résultats de l'expérience dans le salon subjectif, nous apprenons que lorsque l'éblouissement est bas (typiquement pour une valeur UGR inférieur à 17) les appréciations de confort visuel ne sont pas déterminées par les valeurs UGR. Pour prendre en considération correctement cet impact d'inconfort qui est inhibé à la fois par la présence de fortes intensités lumineuses dans le champ visuel mais aussi qui n'a pas d'influence sur le confort lorsque ces fortes intensités lumineuses ne sont pas présentes ou visibles, nous définissons deux fonctions d'évaluation :

$$Fd(UGR) + Fc(UGR) = 1 \quad \text{Equation 58}$$

Les fonctions sont représentées dans la Figure 140 . Les valeurs des fonctions Fd et Fc sont déterminées en fonction du niveau d'éblouissement car nous n'avons pas introduit d'autres sources d'inconfort dans notre modèle.

Les valeurs prises par les fonctions Fc et Fd serviront de coefficient multiplicateur pour déterminer le poids des paramètres de confort et celui des paramètres d'inconfort.

Ainsi nous pouvons faire le diagramme suivant (Figure 140) :





Lors de la création du modèle, seul l'éblouissement pouvait être source d'inconfort. Nous n'avons donc inclus que celui ci. Cependant d'autres sources d'inconfort telles que le papillotement (flicker) peuvent être ajoutées par la suite à ce modèle.

De plus, une des expériences est dédiée à l'évaluation d'éblouissement. Nous allons donc utiliser cette expérience pour déterminer l'importance de ce paramètre.

### Description des facteurs pris en compte pour le modèle

Dans le modèle développé, la plupart des paramètres impliqués sont obtenus à partir des données enregistrées par le gonio-photomètre et ses cartes de luminance.

La partie suivante décrit la méthodologie adoptée pour les calculs.

### Paramètre d'inconfort: l'éblouissement

L'une des principales sources d'inconfort rencontrée est liée à l'éblouissement dû à des sources primaires ou aux réflexions de celles-ci sur des objets. Nous avons donc attaché une importance particulière à ce paramètre en y consacrant une expérience entière.

En effet, la formule classique de l'UGR a été développée alors que les sources à DEL n'étaient pas présentes dans les solutions d'éclairage. De plus, les luminaires à DEL s'écartent des caractéristiques des sources classiques et deux problèmes se posent : (1) les effets d'addition de plusieurs sources à DEL dans une unique ampoule ou luminaire et (2) la dimension de ces sources à DEL parfois très faible avec de fortes intensités lumineuses.

La formule classique de l'UGR CIE a été déterminée pour des sources ayant un angle solide supérieur à 0,0003sr.

La CIE a fait la recommandation d'utiliser une autre formule pour des sources de petites tailles. Nous comparons les deux formules car nous utilisons des sources à la fois petites et larges pendant l'expérience.

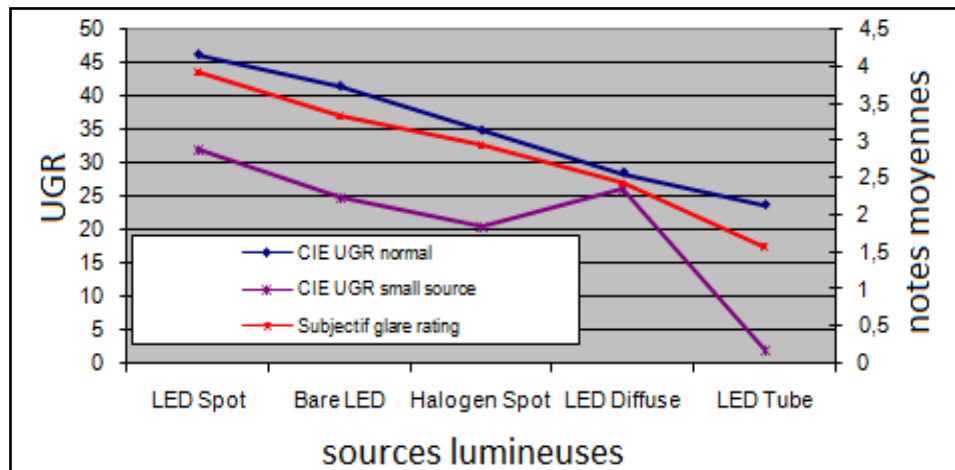


Figure 141 Comparaison entre la formule classique de la CIE UGR et des notes subjectives

Dans la figure ci dessus (Figure 141 ) (expérience sur l'éblouissement) et dans la figure ci-dessous (Figure 142 ) (expérience du salon) nous pouvons noter une bonne corrélation entre la formule d'UGR CIE pour les sources de taille classique et le ressenti d'éblouissement. Mais nous observons, pour la formule d'UGR de petites tailles, un fort impact dû à la taille de certaines sources. La 'DEL diffuse' possède le plus grand angle solide totale. Le 'tube à DEL' a un angle solide totale le plus petit mais, une étendue géométrique plus grande.

Dans le premier cas, la différence entre la formule classique et le ressenti est très petite alors que l'UGR, pour les sources de faibles tailles, surestime l'éblouissement perçu. Dans le second cas, la formule classique montre de légères différences lorsque la formule développée pour les petites sources surestime l'éblouissement comparé à la tendance de l'évaluation subjective. C'est pourquoi, dans le modèle proposé, nous utilisons la formule UGR classique pour les sources de taille normale et pour les sources de faible taille. La valeur de l'UGR sera utilisée comme un indicateur pour la sensation d'inconfort dû à l'éblouissement.

Il est important de souligner la meilleure concordance avec la formule classique car bien des sources lumineuses SSL sont de petites dimensions (inférieures à 50 cm<sup>2</sup>) et la formule de l'UGR pour les petites sources ne semble pas suivre les appréciations du classement subjectif.

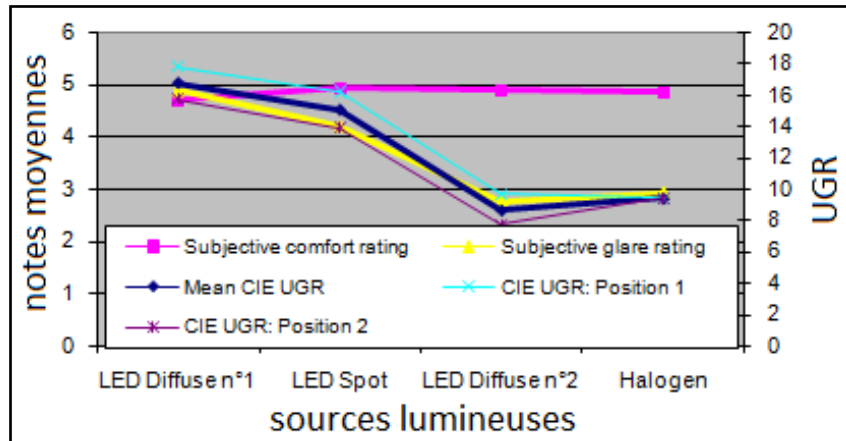


Figure 142 CIE UGR et la notation du confort

Remarque : Sur les courbes ‘Mean CIE UGR’ et ‘Subjective glare rating’ l’éblouissement ressenti suit la même tendance que l’éblouissement mesuré (UGR). Par ailleurs, la courbe du confort visuel ne suit pas la même évolution. Nous pouvons en déduire que de telles valeurs d’éblouissement n’ont pas de conséquences significatives. C’est pourquoi nous fixerons des seuils dépendants de ces paramètres pour les fonctions de pondération.

## Paramètre de confort

Compte tenu de la complexité et du nombre de facteurs qui peuvent entrer en ligne de compte pour déterminer le confort d'une situation, nous avons limité le nombre de paramètres. Nous avons appuyé notre étude sur la rosace de la Figure 143 .

Celle-ci se compose de la façon suivante:

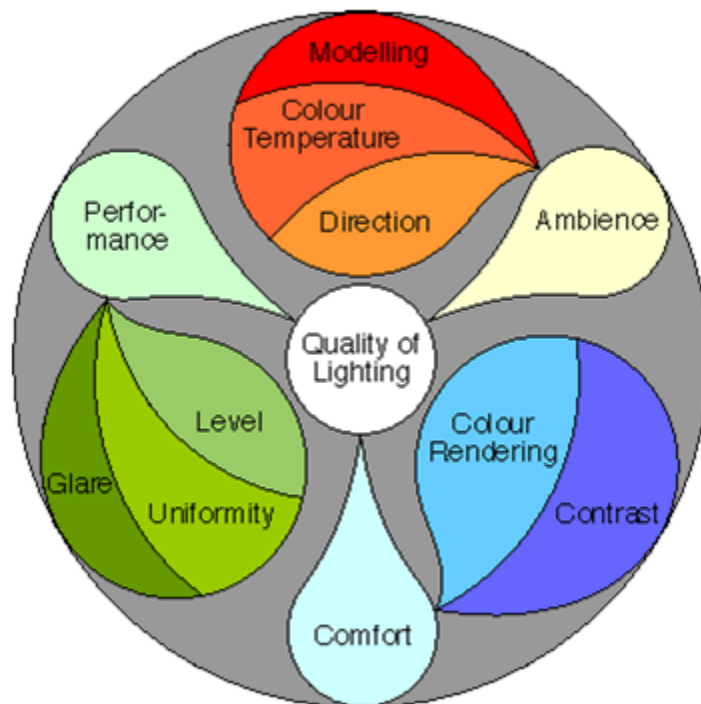


Figure 143 rosace illustrant les paramètres influençant le confort visuel

Pour garantir une bonne qualité d'éclairage il faut que les trois conditions suivantes soient remplies:

- Performance, c'est à dire que l'éclairage permette de réaliser les tâches entreprises dans des conditions satisfaisantes. Cette partie est découpée en trois sous parties : l'éblouissement, l'uniformité et le niveau lumineux.

- Ambiance, c'est à dire que l'atmosphère qui se dégage de l'éclairage soit en concordance avec la scène visuelle. Cette partie est découpée en trois sous parties : la température de couleurs, la direction et la modélisation des formes.

- Confort, c'est à dire que l'on arrive à bien discerner les objets, les textures et les couleurs. Cette partie est découpée en deux sous parties : le rendu des couleurs et le contraste entre zones.

Dans notre modèle de confort visuel, nous avons utilisé les éléments listés dans cette rosace pour déterminer six paramètres de base qui viendront se confronter au paramètre d'inconfort (l'éblouissement).

Nous avons donc:

Le niveau lumineux (1), l'uniformité (2), le contraste avec la modélisation des contours et ombres (3), le rendu des couleurs (4), la CCT (5) et la distribution lumineuse (6).

## Présentation des paramètres visuels

Afin de réaliser notre modèle de confort visuel, nous avons utilisé différents paramètres. Pour chaque paramètre, nous présenterons l'objectif de ce paramètre et ce qu'il représente, avant d'indiquer la façon dont nous l'avons calculé.

### Le niveau lumineux relatif (paramètre n°1) :

Le paramètre 1 correspond à la moyenne des éléments suivants :

- Luminance relative sur les zones d'intérêt

Les zones d'intérêt doivent être suffisamment éclairées pour le travail à effectuer (bureau, surface de travail) ou pour créer un effet esthétique (intérieur d'habitation, objets décoratifs). Il est important également de maintenir des zones médiocrement éclairées afin de bien éviter la distraction (bureau) et pour souligner les meubles et objets décoratifs dans le cadre de la maison.

Le niveau optimal de luminance relative doit dépendre de l'environnement (bureau, maison); comme dans la norme sur les éclairages des lieux de travail, un certain nombre de niveaux sont recommandés en fonction de l'environnement et de la tâche (I, VII). Il est évident que si la zone d'intérêt est trop sombre ou trop éclairée, le confort s'en ressent et donc qu'un niveau optimal existe. Dans le cadre de cette étude nous proposons d'utiliser la fonction gaussienne illustrée sur la Figure 144 .

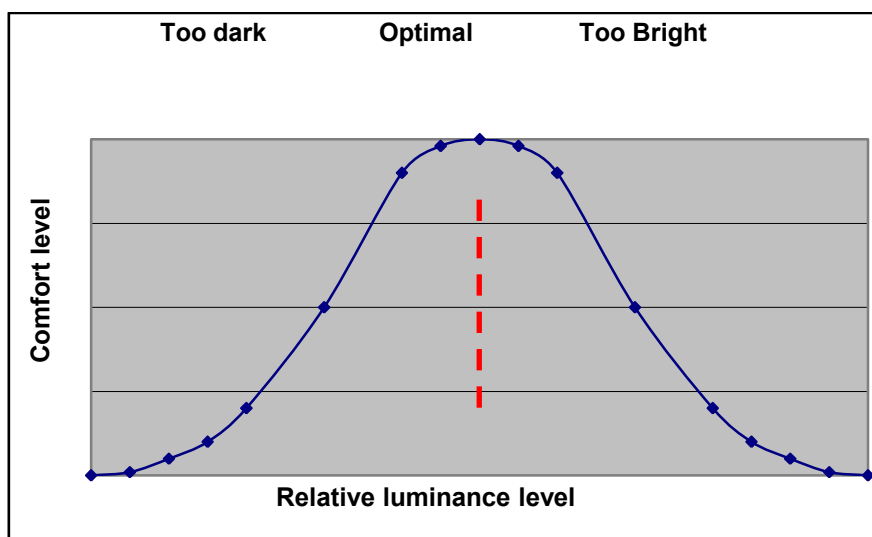


Figure 144 Courbe du niveau de confort en fonction du niveau relatif de luminance

#### - Distribution de la luminance en fonction du type de zone

Un ensemble de zones est sélectionné sur la carte de luminance de l'environnement utilisé dans les tests subjectifs N° 2, 3, 4 et classé selon les zones d'intérêt  $L_i$  (surface de bureau, objets décoratifs, meubles), zones lumineuse  $L_L$  (luminaires et leurs environs) et les zones environnantes/ zones de fond  $L_b$  (plafond, murs, sol). Pour chaque zone, la luminance moyenne est calculée. Dans notre modèle, nous caractérisons la distribution de la lumière dans ces différentes zones par la proportion  $(L_L - L_b)/(L_i - L_b)$ , le confort étant proportionnel à cette fraction.

#### L'uniformité : distribution de la lumière (paramètre n°2) :

Uniformité de luminance à hautes et basses fréquences spatiales.

L'uniformité de la luminance peut être représentée par l'écart-type des valeurs de luminance incluant une analyse spatiale.

La perception du système visuel humain est plus sensible aux variations de luminance en hautes fréquences spatiales. Aussi un effet vignette avec une dégradation douce vers les bords est moins perturbante qu'un modèle périodique ou une transition trop marquée.

Nous avons calculé par ordinateur l'uniformité des basses fréquences (Paramètre N° 4). Dans un premier temps, nous calculons le ratio entre la luminance moyenne au centre de la zone et la luminance du bord de cette zone. Puis nous regardons l'uniformité de la luminance dans la zone : Les hautes fréquences sont calculées par l'écart type des variations pondérées au ratio précédent. Les basses fréquences sont calculées en divisant la luminance moyenne des régions environnantes par la luminance locale (Figure 145 ).

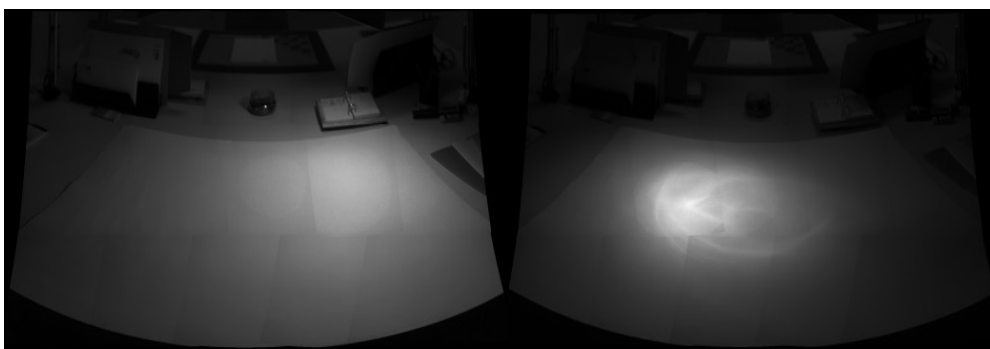


Figure 145      Distribution des luminances sur le plan de travail: à gauche une source diffuse, à droite des non-uniformités dues au réflecteur

### Ombres projetées et lumière structurée (paramètre n°3) :

Lors des expériences subjectives des tests 3 et 4, nous observons que les luminaires de bureau ou de table créent des ombres de différents types : des ombres nettes et marquées ou des ombres estompées, de nos mains, du stylo et de notre avant-bras par exemple. Dans le cas du bureau, les caractéristiques des ombres sont en corrélation avec l'aisance pour écrire et comptent partiellement pour le confort général. Pour notre modèle, nous exploitons la transition complète du bord de l'ombre pour calculer le paramètre. D'autre part, il est à noter que cette transition est proportionnelle à la taille de la source lumineuse.

De plus, dans la configuration du bureau, nous avons observé une différence d'éclairage importante dans les transitions entre les zones du plafond / haut des murs (sombres) et les zones du mur directement éclairées par le plafonnier :

- Dans les configurations A et B qui utilisent le plafonnier avec les tubes fluorescents, nous avons un dégradé lent et continu.
  - Pour les configurations C et D, qui utilisent les tubes à DEL, nous avons des transitions en marche d'escalier (Figure 146 ). Cette transition provient de la construction du tube lui même, les rangées de DEL formant une structure répétitive, structure qui est, de plus, amplifiée par la présence de plusieurs tubes. Cela se répercute sur la distribution angulaire du plafonnier
- Cet effet a été pris en compte dans notre modèle. Mais comme il s'agit d'un cas isolé et unique, aucune mesure physique n'a été faite. Nous avons pris une valeur arbitraire pour le caractériser.

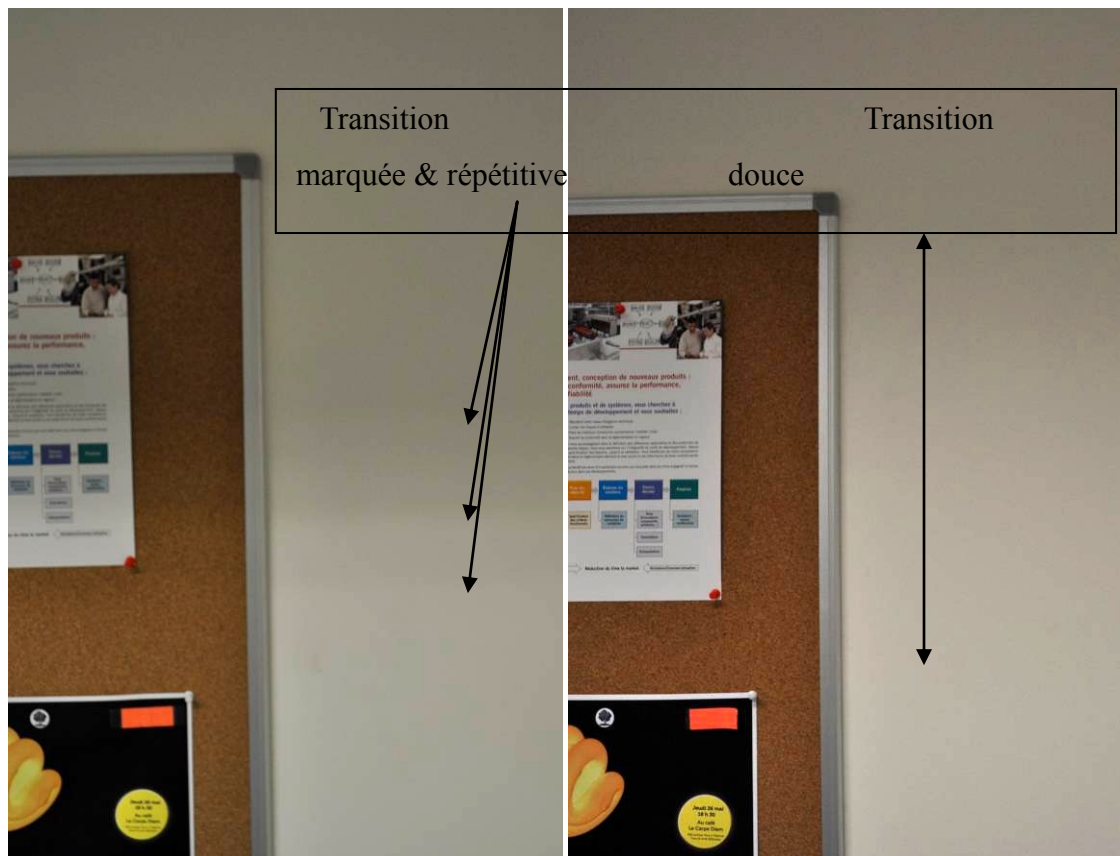


Figure 146 Différence entre les transitions

#### Les effets du rendu des couleurs (paramètre n° 4) :

L'effet du rendu des couleurs sur l'apparence de la couleur des objets est un paramètre qui joue un rôle important dans le confort visuel. Il a été caractérisé ici par deux indices colorimétriques : CRI- CAM02UCS et GAI. Le CRI-CAM02UCS représente la fidélité et le naturel des couleurs. GAI représente l'intensité et la saturation des couleurs. Dans ce modèle, nous avons établi l'évaluation de ce paramètre selon une étude américaine [XLIV]. D'après cette étude, une augmentation de la chromaticité améliore le rendu des couleurs pour les éclairages présentant une faible température de couleur contrairement à ceux présentant une TCP importante.

#### La Température de couleur proximale (paramètre n°5) :

Dans le cadre de l'expérience subjective, nous avons mesuré la TCP en distinguant trois aspects du même phénomène. La valeur en elle-même, le mélange de sources de TCP différentes et la variation spatiale de la TCP d'une source isolée. Le paramètre 5 correspond à la moyenne des éléments suivants.



### La valeur de la TCP

Dans le test n°3 (compartiments), nous avons vu que la qualité de perception des documents proposés augmente avec la température de couleurs de l'éclairage. D'autre part, l'apparence d'une source est caractérisée par sa TCP ; cette valeur donnant une indication sur le type d'atmosphère (froide, chaude ou neutre). Des études montrent qu'une lumière froide est plus stimulante pour un bureau alors qu'une lumière chaude est plus relaxante dans un salon. Il est donc important de prendre en considération, dans l'absolu, la valeur de la TCP pour chaque scénario de test.

### Le mélange de sources à TCP différentes

Nous avons introduit cet effet suite aux observations de certains panelistes sur la surface de travail sur le bureau. Cette surface était jaunâtre avec une lampe halogène alors que l'éclairage ambiant était froid avec les tubes fluorescents. Cet effet est perceptible car le système visuel ne peut s'adapter chromatiquement et simultanément à (1) la lampe halogène (ambiance chaude) et (2) aux tubes fluorescents (ambiance froide).

Pour les expériences dans les salons et en compartiments, les variations de TCP au sein d'une même configuration sont nulles. Dans le cas du salon, comme nous avons une gamme de TCP proche, les variations de la TCP sont négligeables.

### La variation spatiale de la TCP

Quelques sources lumineuses présentent des variations spectrales significatives selon la direction des émissions lumineuses due à la technologie des DEL et des optiques (lentilles de focalisation). Ceci peut conduire à des variations de couleur importantes dans les zones éclairées directement par ce type de source. Cet effet est indésirable sur les surfaces de travail, les objets décoratifs ou pour la lumière ambience. Cet effet peut se définir à partir des variations chromatiques angulaires. On peut alors faire une approximation par les variations angulaires de la température de couleur.

Dans l'exemple illustré figure ci-dessous (Figure 147 ), nous observons un disque jaune au centre avec des contours bleus. Cet effet a été pris en compte au moyen des variations inverses de la température de couleur (soit  $1/TCP$ ) dans notre modèle.

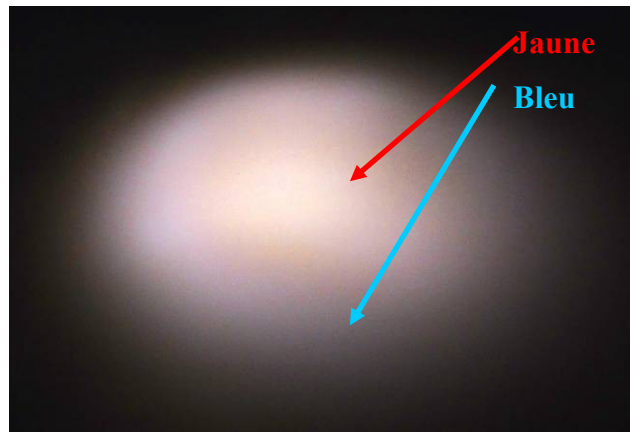


Figure 147 Variation de la TCP spatialement

### La Distribution lumineuse (paramètre n°6) :

La distribution lumineuse dépend à la fois des différents luminaires utilisés et également de la surface éclairée.

Dans l'expérience 2 (salon), nous avons créé diverses apparences en utilisant des luminaires différents : spots, lumière diffuse, diffuseur additionnel ainsi que le dispositif de diffusion du plafond.

Les apparences lumineuses fournies par ces différents luminaires semblent jouer un rôle esthétique important dans la configuration du salon. Nous caractérisons les apparences lumineuses entourant le luminaire en deux zones : l'une comprenant les luminances en dessous de la luminance moyenne ( $S_u$ ) et l'autre avec les luminances au dessus de la luminance moyenne ( $S_a$ ). Le ratio  $S_a/S_u$  représente la diffusion du luminaire. Elle est proportionnelle à la perception du confort visuel.

Dans l'expérience 4 (bureau), la taille de la zone de travail couverte par l'éclairage a été utilisée pour déterminer ce paramètre compte tenu de son importance pour l'utilisateur. Ce paramètre est déterminé à partir d'un calcul sur la zone d'intérêt : la zone où la luminance supérieure à un seuil donné délimite la surface de travail. Plus cette zone est grande, plus l'espace de travail de l'observateur est grand, plus il pourra prendre ses aises.

Ci dessous l'organigramme des différents paramètres (Figure 148 ).

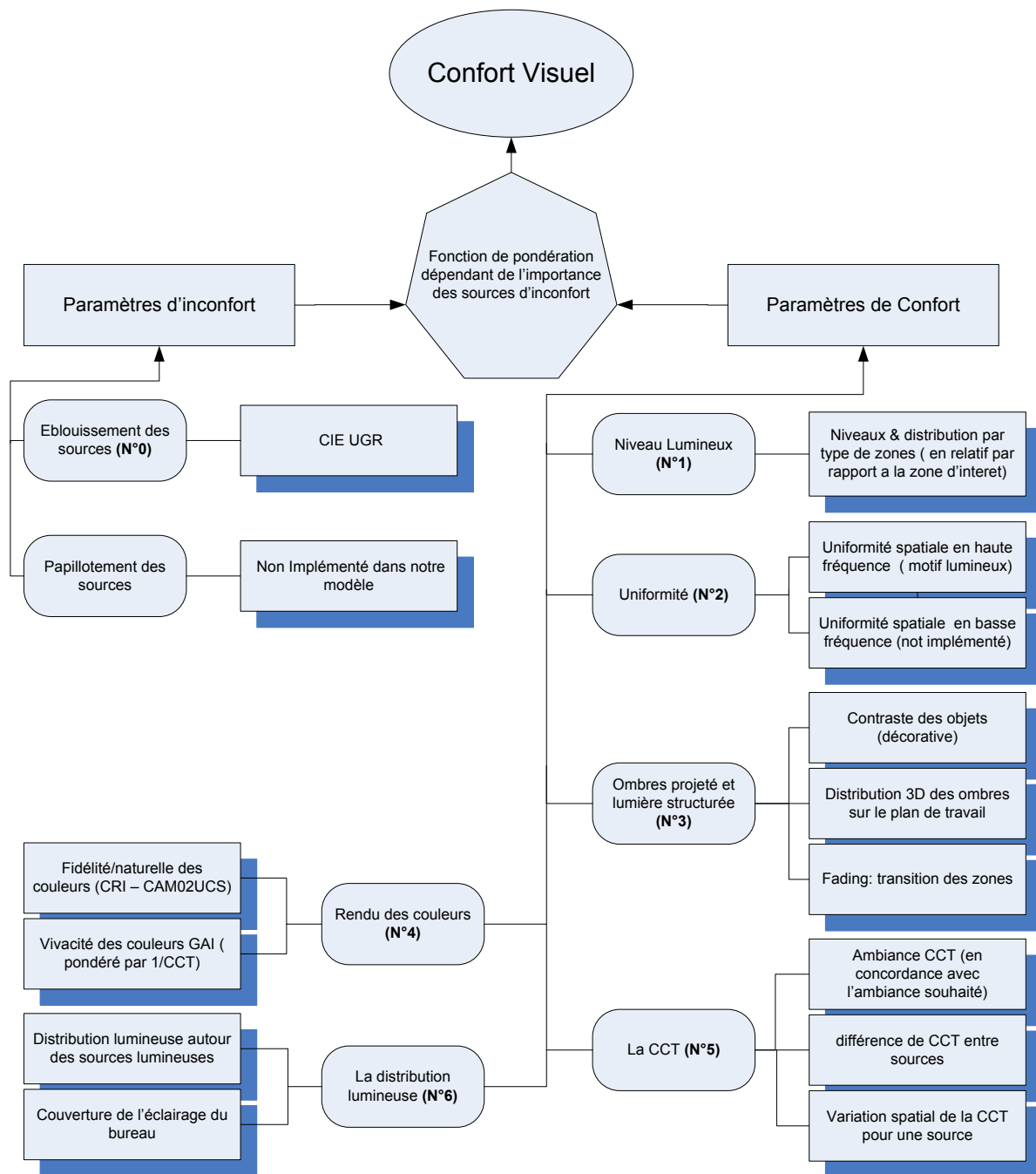


Figure 148 Organigramme de fonctionnement de notre modèle

## Première approche d'un modèle de confort visuel

Dans un premier temps, nous avons réalisé une première approche en ajustant manuellement les six paramètres ; et ce pour chaque expérience. Tout d'abord, nous fixons le poids de chaque paramètre à une valeur moyenne de 2. Ensuite, pour chaque paramètre et pour chaque expérience, nous regardons si le paramètre semblait avoir plus d'influence en augmentant la valeur du poids à 3, ou en diminuant la valeur du poids à 1. Puis, à partir des valeurs

obtenues, nous avons étudié les différences qu'il y avait entre les configurations et nous avons optimisé les valeurs précédentes afin d'obtenir un modèle le plus général possible. Enfin, nous normalisons ces valeurs en fonction du nombre de paramètres. En effet, dans la configuration salon, nous n'avons pas accès aux valeurs de l'uniformité car les scènes étaient trop complexes; dans la configuration en compartiments, de par leurs conceptions, le paramètre de l'uniformité et de la distribution lumineuse n'a pas été calculé car identique entre chaque configuration. La Table 30 montre les valeurs obtenues. L'annexe 5 présente les valeurs physiques de chaque paramètre.

Paramètre n°	Pourcentage des paramètres dans l'expérience en salon	Pourcentage des paramètres dans l'expérience en compartiment	Pourcentage des paramètres dans l'expérience en bureau	Valeurs du poids (1-2 ou 3)
<b>N°0 Glare</b>	100	100	100	/
<b>N°1 Le niveau lumineux</b>	27.2	37	21	3
<b>N°2 L'uniformité</b>			21	3
<b>N°3 Ombres projetées et lumière structurée</b>	27.2	37	21	3
<b>N°4 Le rendu des couleurs</b>	9.2	13	8	1
<b>N°5 La TCP</b>	9.2	13	8	1
<b>N°6 La Distribution lumineuse</b>	27.2		21	3

Table 30 Poids (en %) de chaque paramètre en fonction de la situation

## Corrélation du modèle avec l'expérience subjective

Nous allons à présent comparer les prévisions fournies par notre modèle avec les résultats obtenus lors de l'expérience subjective.

La première comparaison (Figure 149 ) s'effectue dans la configuration du salon. Nous obtenons un coefficient de corrélation de Pearson de 0.96, ce qui est correct. Cependant nous pouvons remarquer que notre modèle a des difficultés pour différencier la solution utilisant les DEL à spot et celles utilisant les DEL diffuses.

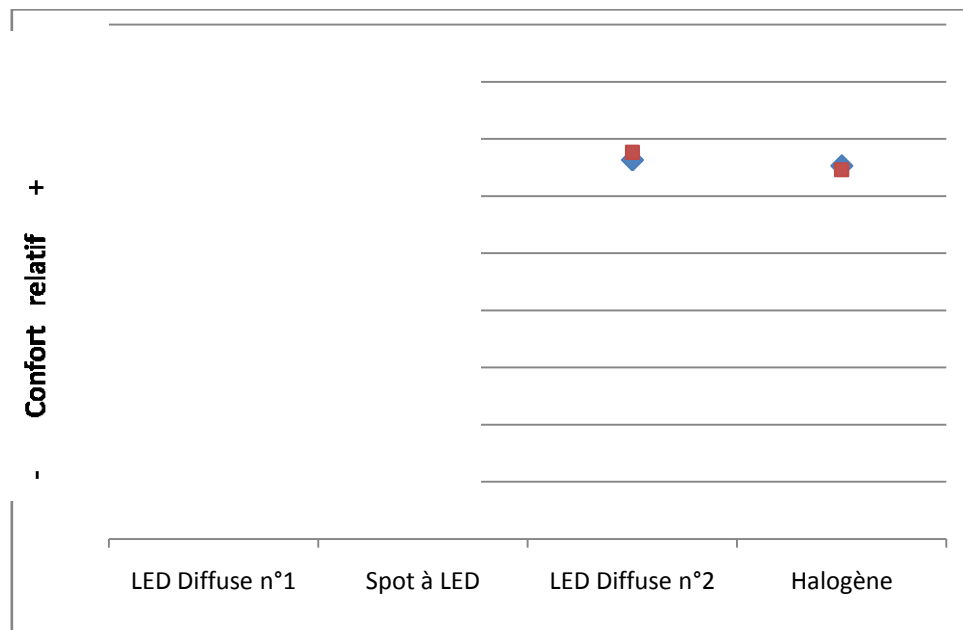


Figure 149 Comparaison entre le modèle et les notes subjectives dans le test en salon

Le graphique ci-dessous (Figure 150 ) correspond à l'expérience qui s'est déroulée dans les compartiments, le coefficient de corrélation de Pearson est de 0.94. On remarque que les technologies à DEL suivent bien le ressenti subjectif. Cependant la technologie halogène est plus appréciée que dans la prédiction du modèle. Peut être a-t-elle été sur-notée par les utilisateurs car celle ci leur paraissait habituelle?

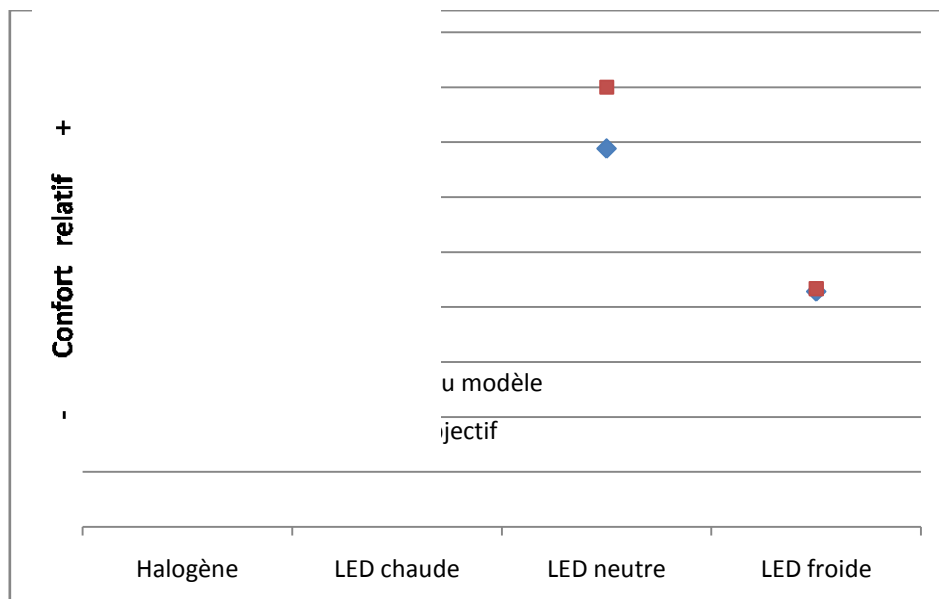


Figure 150 Comparaison entre le modèle et les notes subjectives dans le test en compartiments

Le graphique ci-dessous (Figure 151 ) représente la comparaison du modèle et des notes obtenues pour le bureau subjectif. Le coefficient de corrélation de Pearson est de 0.99, ce qui est très prometteur. Dans l'ensemble cette configuration est plus facile à analyser du fait de la faible divergence que les observateurs ont pu faire : ils cherchent, dans l'ensemble, un environnement performant, et les divergences de goût apparaissent moins que dans la configuration salon.

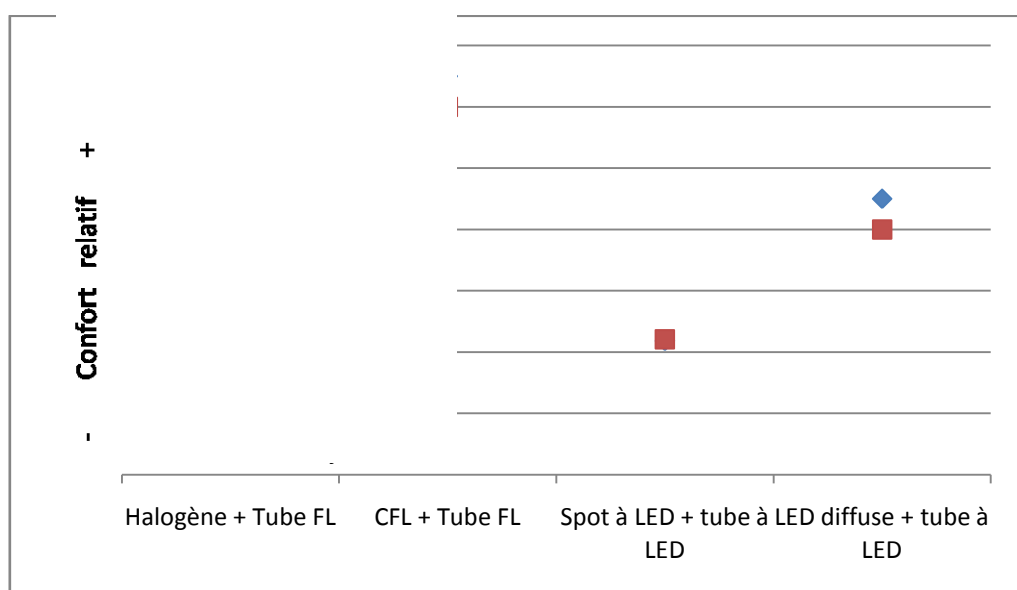


Figure 151 Comparaison entre le modèle et les notes subjectives dans le test en bureau

A présent, nous allons regarder le résultat obtenu pour l'ensemble des expériences. La figure ci-dessous (Figure 152 ) représente l'ensemble des résultats prédits et les notations subjectives obtenues. Nous avons un coefficient de corrélation de Pearson de 0.96.

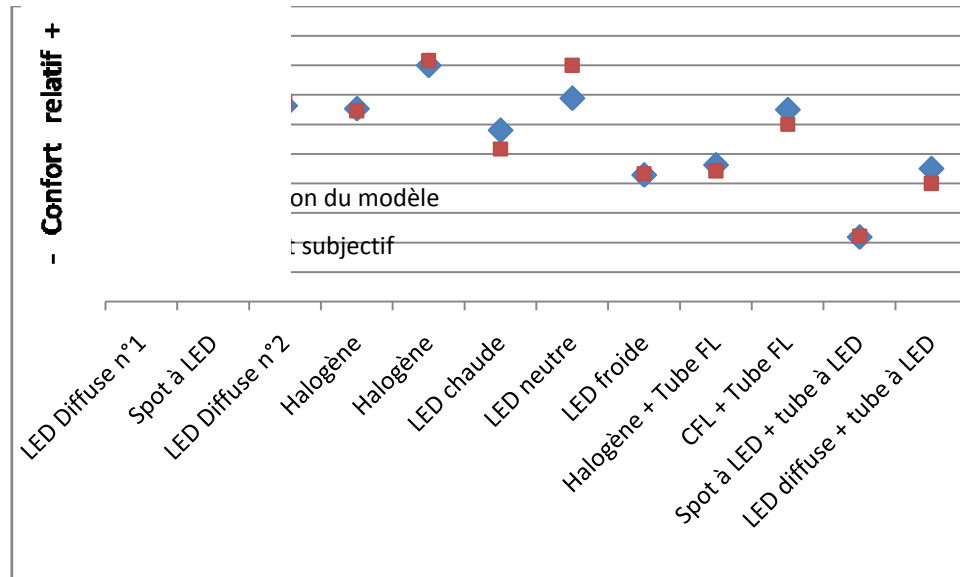


Figure 152 Comparaison entre le modèle et les notes subjectives pour l'ensemble des expériences

## Approche mathématique

Cette seconde approche porte sur une résolution mathématique reposant un système d'équation à plusieurs inconnues. Pour ce faire, nous avons gardé la fonction de pondération due aux sources d'inconfort. Ensuite, nous avons défini un système linéaire d'équations utilisant les paramètres de confort calculés.

$$Val_{confort} = F(UGR) * F(P1, P2, P3, P4, P5, P6) \quad \text{Équation 59}$$

avec

$$F(P1, P2, P3, P4, P5, P6) = a1 P1 + a2 P2 + a3 P3 + a4 P4 + a5 P5 + a6 P6 \quad \text{Équation 60}$$

Nous obtenons un système à 12 équations qui possède six facteurs :

(a1, a2, a3, a4, a5, a6)

Ces matrices se trouvent en annexe.

Afin de traiter plus facilement les données, j'ai défini des matrices correspondant (1) aux paramètres mesurés, (2) aux valeurs subjectives et une dernière, inconnue(3) avec le facteur à déterminer. Pour résoudre ce système de 12 équations à 6 inconnues, il n'y a pas de solution mathématique. Cette « non réponse » mathématique corrobore le fait qu'il n'y a pas deux équations identiques. Ceci confirme qu'il n'y a pas deux configurations similaires dans notre modèle.

Notre système ne possède que six degrés de liberté pour douze équations de configuration.

Ainsi, pour le résoudre, il suffit de sélectionner seulement six équations. Cependant, comme le paramètre n°2 n'est pas présent dans les configurations du salon et des compartiments, il est nécessaire d'utiliser au moins l'une des équations basées sur les mesures et le résultat subjectif du bureau qui, lui, utilise l'ensemble des paramètres.

Nous avons résolu le système en utilisant six équations aléatoires compte tenu de la remarque précédente. La Table 31 présente les résultats pour différentes combinaisons. Toutes les combinaisons ne sont pas présentées ici par mesure de clarté. Par exemple, certaines combinaisons s'appuient sur des équations provenant des trois expériences. Les configurations ont été renommées de 1 à 4 pour le salon, puis de 5 à 8 pour les compartiments, enfin de 9 à 12 pour le bureau. La numérotation correspond à l'ordre utilisé lors des figures précédentes.

salon	1 à 4		1 à 4	1 à 2	3 à 4			
compartiment	4 à 8	4 à 8					5 à 6	7 à 8
bureau	9 à 10	11 à 12	9 à 10	11 à 12	9 à 12	9 à 12	9 à 12	9 à 12
a1=	5,9534	5,9534	0,3806	0,4756	35,0242	0,8642	0,3700	1,0039
a2=	1,3582	-0,4897	0,2013	0,2303	11,6823	0,2175	-0,1824	0,5103
a3=	-1,0153	-1,0153	0,3671	0,4544	1,2996	0,1755	-0,0007	0,3483
a4=	-10,2542	-10,2542	0,0018	-0,3189	-23,055	-0,2210	0,5460	-0,7734
a5=	3,6689	3,6689	0,0040	0,1138	-6,8070	0,0653	0,1988	0,0014
a6=	-1,5601	4,1682	0,1983	0,1975	1,0742	0,1839	0,2119	0,1445

Table 31 exemple des facteurs trouvés par le système d'équations

On remarque qu'hormis le résultat utilisant les configurations 1 à 4 et 9 à 10, toutes les autres résolutions nous donnent au moins un facteur 'a<sub>x</sub>' négatif.

Bien que mathématiquement ces solutions existent, nous ne les avons pas gardées car elles proposent un facteur négatif qui impliquerait que notre paramètre de confort joue un rôle négatif dans l'appréciation du confort.



Ainsi nous avons sélectionné la solution suivante:

salon	1 à 4	Paramètre dans la première approche
compartiment		
bureau	9 à 10	
a1=	0,3806	3
a2=	0,2013	3
a3=	0,3671	3
a4=	0,0018	1
a5=	0,0040	1
a6=	0,1983	3

Table 32 facteurs mathématiques choisis.

Premièrement, on peut remarquer sur la Table 32 que la tendance générale de cette solution et du modèle défini précédemment donnent peu d'importance aux facteurs a4 et a5. Ces facteurs semblent avoir peu d'impact, comparativement aux quatre autres facteurs.

Le facteur a4 correspond au rendu des couleurs. Dans cette expérience, contrairement à l'expérience sur le rendu des couleurs, l'ensemble des solutions d'éclairage a un rendu des couleurs convenable ( $CIE\ Ra > 70$ ). Ceci explique la faible participation de ce facteur.

Le facteur a5 correspond à la TCP et aux variations de celle-ci. L'œil ayant des capacités d'adaptation chromatique, il est possible que ce ne soit pas un facteur si aggravant, à la condition de rester dans une certaine gamme de TCP.

## Corrélation du modèle mathématique avec l'expérience subjective

Nous allons, à présent, utiliser les facteurs des paramètres calculés dans l'étape précédente pour mettre en relation le comportement de la prédiction de confort visuel avec les résultats obtenus lors de l'expérience subjective.

La première comparaison (Figure 153 et Figure 149 ) s'effectue dans la configuration du salon. Nous obtenons un coefficient de corrélation de Pearson de 1. Ce qui est attendu, étant donné l'utilisation des quatre configurations d'éclairage pour la résolution du système.

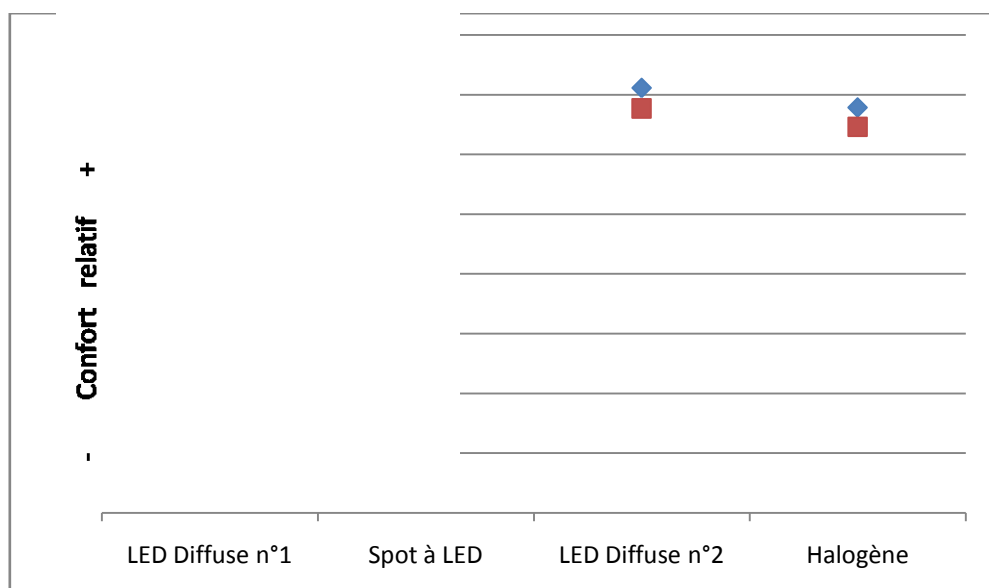


Figure 153 Comparaison entre le modèle mathématique et les notes subjectives dans le test en salon

Le graphique ci-dessous (Figure 154 ) correspond à la comparaison du modèle mathématique et des résultats de l'expérience qui s'est déroulée dans les compartiments. Le coefficient de corrélation de Pearson est de 0.95. Cette prédiction est intéressante étant donné que notre système n'utilise aucune configuration d'éclairage de cette expérience. Seule la LED Chaude semble avoir une prédiction mathématique différente de l'évaluation subjective.

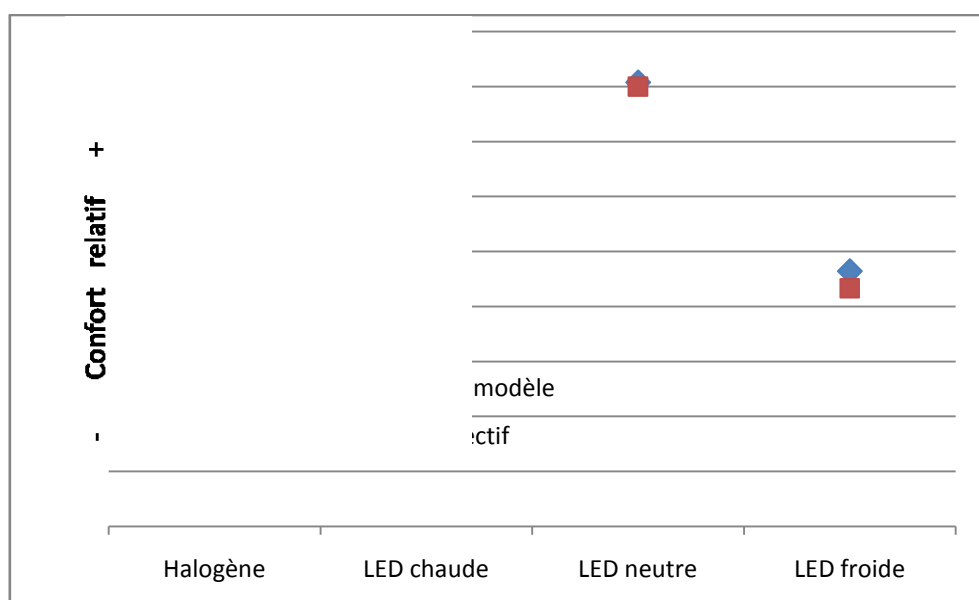


Figure 154 Comparaison entre le modèle mathématique et les notes subjectives dans le test en compartiments

Le graphique ci-dessous (Figure 155 et Figure 151 ) correspond à la comparaison du modèle mathématique et des notes obtenues pour le bureau subjectif. Le coefficient de corrélation de Pearson est de 0.999. Ceci montre une relation satisfaisante entre le modèle mathématique et l'évaluation subjective. Ce résultat est d'autant plus remarquable que nous n'utilisons que deux équations sur les quatre de cette expérience.

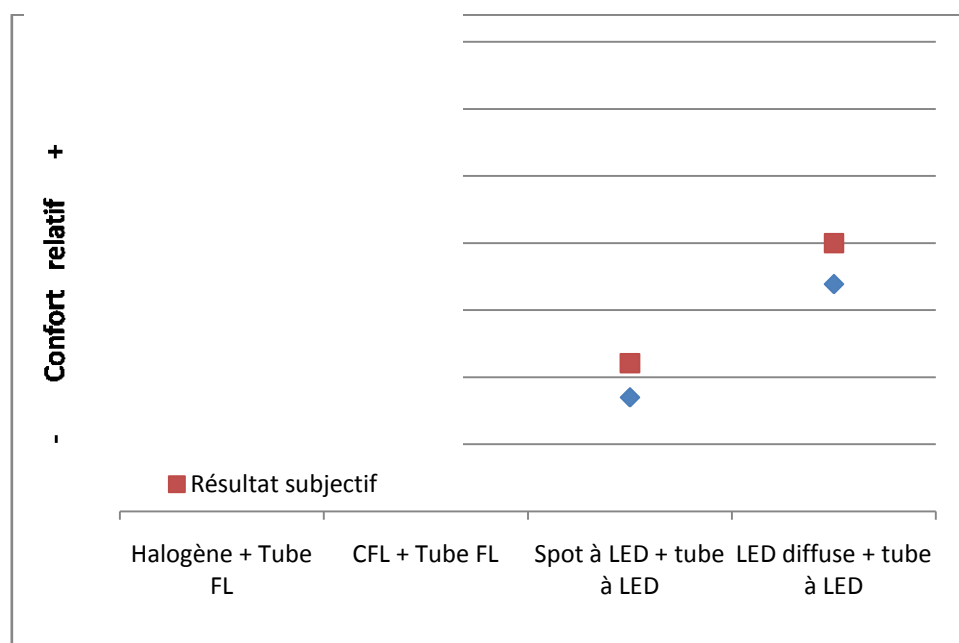


Figure 155 Comparaison entre le modèle mathématique et les notes subjectives dans le test en bureau

Observons maintenant le résultat obtenu pour l'ensemble des expériences. La Figure 156 représente l'ensemble des résultats prédits et les notations subjectives obtenues. Nous avons un coefficient de corrélation de Pearson de 0.96. D'un point de vue global, l'approche mathématique est un bon comparatif entre les notes subjectives et les paramètres mesurés dans toutes les expériences.

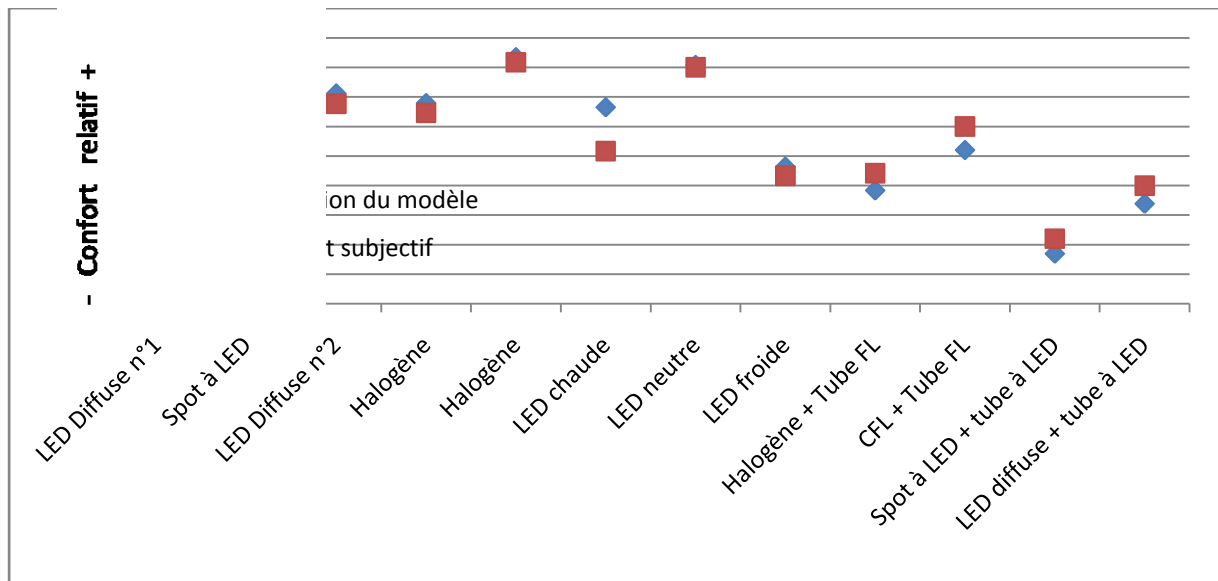


Figure 156 Comparaison entre le modèle mathématique et les notes subjectives pour l'ensemble des expériences

### Synthèse des propositions et perspectives d'amélioration

Comme nous venons de le voir, nous obtenons une bonne corrélation entre les deux types de modèles et les résultats subjectifs. Il serait intéressant de poursuivre cet axe de recherche en réalisant d'autres expériences subjectives et en multipliant les scénarii d'éclairage. En effet, comme nous avons pu le constater, l'importance des six paramètres considérés dans ces modèles dépendent de la nature de l'environnement. Nous soulignerons notamment que, dans la configuration bureau, l'éclairage le plus diffusant présente la plus forte préférence des observateurs alors que dans la configuration salon, c'est l'éclairage à spots qui est préféré. Nous expliquons cela par le fait que nous préférons un éclairage uniforme, permettant une maîtrise de l'environnement lorsque l'on doit effectuer des actions alors que dans un salon, où l'on se trouve pour se reposer, recevoir,... l'œil aime se distraire et les jeux de lumière et d'ombres constituent un attrait visuel plus attractif qu'un mur éclairé d'une façon homogène.



## Conclusion

Les travaux réalisés dans cette thèse ont permis d'évaluer, d'améliorer et d'étendre des indices ou des métriques de qualité pour l'éclairage intérieur s'appliquant aux technologies traditionnelles et aux technologies à LED. Deux aspects de qualité d'éclairage ont été abordés dans cette thèse : le rendu des couleurs et le confort visuel. Pour débiter l'étude, une recherche bibliographique approfondie a été conduite en prenant en compte les articles techniques et scientifiques, les guides et les normes. Cette étape a permis de dresser un état de l'art des attributs et des métriques relatifs à la mesure de la qualité de l'éclairage. Pour l'étude de la perception humaine du rendu des couleurs et du confort visuel, nous avons réalisé des expériences subjectives en laboratoire. Celles-ci étaient ainsi effectuées dans des environnements reproductibles, contrôlés et caractérisés. Nous avons choisi des panels d'observateurs naïfs pour refléter la perception moyenne des usagers et éviter les biais de jugement de professionnels qui pourraient être trop influencés par leurs formations, leurs pratiques et leurs expériences.

Pour l'expérience de la perception du rendu des couleurs, une pièce meublée en salon a été construite avec un système d'éclairage spécial au plafond permettant la permutation rapide de différentes sources d'éclairage réglées pour produire le même niveau lumineux. Un diffuseur permet de répartir uniformément la lumière issue de ces sources dans la pièce et donc seul le spectre lumineux changeait aux cours des expériences subjectives. Dans le cadre de cette expérience, nous avons recueilli le jugement de 43 panélistes pour neuf éclairages différents

répartis en deux groupes de température de couleur (froide  $\sim 6000$  K, chaude  $\sim 2700$  K). Les commentaires de fin d'expérience et les notes subjectives nous ont confirmé ce choix de températures de couleur : un espace de type salon n'est pas systématiquement préféré en éclairage chaud. La contrainte principale d'exécution de ce test réside dans la présentation de d'un grand nombre, 83 dans cette étude, de séquences aléatoires d'exposition de neuf sources d'éclairage tout en conservant les caractéristiques colorimétriques et photométriques de chacune des sources. L'ensemble des précautions (pièce stabilisée en température, alimentation électrique régulée, mise en chauffe des lampes avant le début de chaque expérience) a permis d'obtenir une stabilité nécessaire et suffisante compte tenu de la durée du test subjectif de trois semaines. L'analyse des notes subjectives moyennes a permis d'identifier les paramètres influençant la perception du rendu des couleurs. Les nouvelles métriques de fidélité, comme le CRI CAM02UCS, obtiennent de meilleures corrélations que la métrique de fidélité de référence en vigueur (CIE CRI 13.3) concernant la prédiction de la préférence du rendu des couleurs. La corrélation des métriques étudiées nous indique que l'augmentation de la saturation, ou le chroma, est un facteur d'amélioration pour les sources chaudes mais pas pour les sources froides. Pour le rendu des couleurs, il conviendrait d'entreprendre des études complémentaires pour mesurer la préférence concernant les sources chaudes. L'évaluation in-situ du rendu, le sujet étant immergé dans l'ambiance lumineuse, nous a permis d'obtenir des résultats plus généraux que ceux obtenus par les études utilisant des objets dans des boîtes à lumière. Nous avons montré la faiblesse et la dépendance de certaines métriques proposées vis à vis de divers paramètres. Par exemple, les résultats de l'indice MCRI sont très dépendants du facteur d'adaptation D. Le jeu de TCS (nombre, répartition, caractéristiques) a un impact important sur les résultats pour toutes les métriques de fidélité. Pour étudier cet impact, un jeu d'échantillons mathématiques uniformément distribué (teinte, chroma) dans un espace de couleur uniforme (UCS) et couvrant tout le spectre visible a été élaboré. Il a ensuite été utilisé avec les métriques de fidélité pour comparer les résultats avec ceux obtenus avec les jeux d'échantillons de couleurs tests développés et publiés avec les métriques associées.

Pour l'expérience subjective relative au confort visuel, nous avons mis en place un ensemble de quatre tests en variant les caractéristiques de la scène d'éclairage telles que la distribution, le niveau et la température de couleur proximale de l'éclairage et l'environnement considéré (bureau/salon/compartiment/fond uniforme). Nous avons développé des appareils pour

caractériser les environnements lumineux. Par exemple, notre étude a nécessité l'utilisation d'une caméra photométrique montée sur un goniomètre à 2 axes afin de numériser l'ensemble du champ de vision. Des outils comme "l'eye-tracker" nous ont permis de corréler des sources d'inconfort visuel avec les mouvements oculaires. Les entretiens de fin d'expérience nous ont apporté des informations qualitatives sur les paramètres d'influence relatifs aux qualités visuelles de la scène. Concernant l'évaluation de l'éblouissement, l'additivité des sources et la prise en compte de leurs étendues dans la formule de l'UGR de la CIE sont remises en cause et discutées dans de nombreuses publications et surtout dans le cadre de leur application à l'éclairage à DEL. L'étude menée a montré que la formule alternative de l'UGR de la CIE pour les petites sources était moins performante que celle des sources d'étendue normale. L'étude du confort visuel nous a permis d'identifier et de définir un ensemble de facteurs clefs, en plus de l'UGR, qui ont été définis et mesurés. En fonction du scénario d'éclairage, la température de couleur proximale, les niveaux d'éclairement, les ratios de luminance et la distribution lumineuse globale ou sur des plans d'intérêt, sont des paramètres à utiliser pour évaluer le confort visuel. Un premier modèle de prédiction du confort visuel a été établi à partir de la pondération de ces paramètres selon l'environnement considéré. Les environnements utilisés pour les tests étaient variés et représentatifs de ceux utilisés dans la vie courante. Notre approche pour évaluer le confort visuel a permis d'élaborer un modèle simple qui s'appuie sur des mesures physiques. Ce modèle s'est avéré avoir de bonnes corrélations avec les notes subjectives recueillies. Ces résultats ont été présentés à des congrès internationaux et font l'objet de publications scientifiques.

Il est à noter que notre travail a nécessité la réalisation de nouveaux outils adaptés à la caractérisation des environnements lumineux comme le système gonio-caméra photométrique. Il serait intéressant de faire davantage de traitements des données de l'étude pour améliorer les modèles et de faire d'autres expériences subjectives avec des conditions différentes pour valider ou perfectionner ces derniers. Cette étude contribue à la mise en place de bases pour un modèle de qualité qui pourra être utilisé dans la mise au point d'éclairages intelligents et adaptés à l'activité humaine. D'autres paramètres spécifiques devraient être pris en compte comme l'effet de papillotement invisible (fatigue visuelle, gêne pour les tâches visuelles et maux de tête) et la composition spectrale (stimulation et rythmes biologiques).



Le développement de la métrologie de l'immatériel (ou soft-metrology), relative à l'utilisation de la mesure de l'homme et de l'homme comme moyen de mesure, est très récent ainsi que l'émergence d'une discipline à part entière consacré aux études psycho-sensorielles. La prise en compte de l'éclairage pour le bien-être ou la productivité sont aussi des considérations d'actualité. L'utilisation de la lumière à des fins thérapeutiques est aussi nouvelle. La flexibilité, l'adaptabilité et les spécifications particulières des nouveaux éclairages à DEL remettent en question les anciennes métriques développées avec les sources traditionnelles, les normes et les usages. Tous ces facteurs scientifiques, techniques et sociétaux vont stimuler et accompagner la recherche vers une meilleure métrologie de la qualité visuelle.

En cette année 2015, année de la lumière, cette thèse traite de la spécification de la qualité des éclairages. L'éclairage de demain offrira des possibilités nouvelles telles que le réglage automatique du niveau lumineux, le changement de spectre, le changement de la directivité pour améliorer le confort, le bien être, les tâches humaines (productivité, apprentissage) et le traitement de certaines pathologies ainsi qu'un meilleur environnement pour les travailleurs en horaire décalé. Pour guider les consommateurs et les professionnels dans le choix et l'installation des nouvelles technologies d'éclairage, il est nécessaire d'évoluer rapidement vers de meilleurs indices de qualité pour les différents lieux de la vie courante et cela nécessitera de nombreuses études de large envergure compte tenu de la diversité de spécification des environnements lumineux, de la complexité de la perception psycho-visuelle, des dépendances socioculturelles et des enjeux industriels et environnementaux.

## Bibliographie

- [I] Akashi, Y., *Unified glare rating (UGR) and subjective appraisal of discomfort glare*, lighting res. Technol. 28(4) p 199-206 (1996)
- [II] Beng, X. G., Houser, K. W., *A review of colour rendering indices and their application to commercial light sources*, Light. Res. Technol. 36, (2004) p 183-199.
- [III] Bodrogi, P., Bruckner, S.T., Khanh, Q., *Ordinal scale based description of Colour Rendering*, Col. Res. Appl. 36, (2010) p 272-285.
- [IV] Bodrogi, P. et al., *Research report and proposal for a new assessment procedure – written for CIE TC 1-69: Color rendition by white light sources* (2009).
- [V] Bodrogi, P., Csuti, P., Horváth, P., Schanda, J., *Why does the CIE Colour Rendering Index fail for white RGB LED light sources?*, CIE Expert Symposium on LED Light Sources, Tokyo, (2004).
- [VI] Boer, J.B. de., Fischer, D., *Interior lighting*, Deventer (Netherland) (1978).
- [VII] Cai, H., Chung, T., *Evaluating discomfort glare from non-uniform electric light sources*, Light. Res. Technol. 3, (2013) p 267-294.
- [VIII] CIE. *Publication No. 13: Method of measuring and specifying colour rendering properties of light sources*, CIE, Vienna, (1965).
- [IX] CIE. *Publication No. 13.2: Method of measuring and specifying colour rendering properties of light sources*, CIE, Vienna, (1974).
- [X] CIE. *Publication No. 10.9: Method of Measuring and Specifying Colour Rendering Properties of Light Sources*, CIE, Vienna, (1995).

- [XI] CIE. *Publication No. 117: Discomfort glare in interior lighting*, (1995).
- [XII] CIE. *Publication No. 127: Measurement of LEDs*, (2007).
- [XIII] CIE. *Publication No. 147: Collection on glare*, (2002).
- [XIV] CIE. *Publication No 177: Color rendering of white LEDs light sources*, (2007).
- [XV] CIE. Collection research note: *Colour rendering*, TC 1-33 closing remarks (1999).
- [XVI] Chiu, X., Chen, Y., *The appropriate illuminance combinations of a LED desk lamp and ambient lighting based on visual comfort*, Proceeding of the CIE 20120 Lighting Quality and Energy Efficiency, (Vienna 2010), 161-164
- [XVII] Croome, Derek J. Noise, *Buildings and People*, Pergamon Press, (1977).
- [XVIII] Davis, W., Ohno, Y., *Approaches to color rendering measurement*, J. Mod. Opt. 56(13), (2009) p 1412-1419.
- [XIX] Davis, W., Ohno, Y., *Color quality scale*, Opt. Eng. 49(3), 033602, (2010) 16 pages.
- [XX] Davis, W., Ohno, Y., *Toward an improved color rendering metric*, SPIE 5<sup>th</sup> conference on SSL, (2005).
- [XXI] Dikel, E.E., Burns, G.J., Veitch, J.A., Mancini, S., Newsham, G.R., *Preferred chromaticity of color-tunable LED lighting*. LEUKOS. 10(2):101-115. (2014)
- [XXII] DiLaura, D., Houser, K., Mistrick, R., Steffy, G., *The Lighting Handbook 10th Edition* ISBN : # 978-0-87995-241-9
- [XXIII] EN 12464-1:2002 *Light and Lighting - Lighting of work places Part 1: Indoor work places*
- [XXIV] Fairman, H.S., *How the CIE 1931 Color-Matching Functions Were Derived from Wright-Guild Data*, Col. Res. and Appl. 22, (1996) p 11-23
- [XXV] Fotios, S. A. "*The perception of light sources of different colour properties*," PhD thesis, UMIST UK, Manchester, (1997).
- [XXVI] Fumagalli, S., Bonanomi, C., Rizzi, A., *Experimental assessment of color-rendering indices and color appearance under varying setups*, Journal of Modern Optics, London (2014) p 56-66.
- [XXVII] Garcia, M., Perraudau, M., Carré, S., Martinons, C., *Récapitulatif des methodes d'évaluation de l'ergonomie et du confort visuels*, Project CITADEL, Jalon J2.2.1, Août (2010).
- [XXVIII] Godish, Thad. *Indoor Environmental Quality*. CRC Press, (2000).

- [XXIX] Hashimoto, K., Yano, T., Shimizu, M., Nayatani, Y., *New method for specifying color-rendering properties of light sources based on feeling of contrast*, Col. Res. and Appl. 32, (2007) p 361-371.
- [XXX] Iacomussi, P., Rossi, G., Rossi, L., *A Comparison Between Different Light Sources Induced Glare on Perceived Contrast*, Lighting & Engineering Svetotekhnika, Vol 20, no.1, (2012)
- [XXXI] Jost, S., Avouac, P., Fontoynt, M., *Preferred color rendition of skin under LED sources*, LEUKOS, in press, Vol.12 (1-2), (2016).
- [XXXII] Kasahara, T., et Al. *Discomfort glare caused by white LED light source*, J. Light & vis. Env. 30(2), 95-103
- [XXXIII] Kowaliski, P., *Vision et mesure de la couleur*, Masson. Paris (1990).
- [XXXIV] Lee, C.M., Kim, H., Choi, D.S., *A study on the estimation of discomfort glare for LED luminaires*, Conference proceedings of 26 session of the CIE, (July 2007), Benijing, D3-33-36
- [XXXV] Li, C. et Al. *Assessing Colour Rendering Properties of Daylight Sources part II: a new colour rendering index*, CRI-CAM02UCS – University of Leeds, (2011).
- [XXXVI] Li, C. et Al. *Eveluation of light source based upon colour appearance and colour preference assessments*, AICColor Science For Industry, (2007).
- [XXXVII] Luo, R. *The quality of light sources*, Coloration Technology, 127, (2011) p 75-87.
- [XXXVIII] Massol, L., *Les LED pour l'éclairage*, Dunod. Paris (2012).
- [XXXIX] Mueller, C.G., Rudolpf, M., *L'œil et la lumière*, Le monde des sciences. Paris (1966).
- [XL] Ohno, Y., Fein M.,. *Vision experiment on acceptable and preferred white light chromaticity for lighting*. In: Proceedings of CIE 2014 “Lighting Quality and Energy Efficiency”; 2014 Apr 23-26; KualaLumpur, Malaysia. (2014)
- [XLI] Ohno, Y., *Color rendering and luminous efficacy of white LED spectra*, SPIE 4<sup>th</sup> conference on SSL, (2004).
- [XLII] Ohno, Y., *Spectral design considerations for white LED color rendering,”* Opt. Eng. 44(11), 111302, (2005) 9 pages.
- [XLIII] Paul,B.M., Einhorn,H. D., *Discomfort glare from small light sources*, Lighing Res Technol. 31, p 139-144 (1999)

- [XLIV] Rea, M.S., Freyssinier-Nova, J.P., *Color Rendering: a tale of two metrics*, Col. Res. Appl. 33, (2007) p 192-202.
- [XLV] Rea, M.S., Freyssinier-Nova, J.P., *Color Rendering: beyond pride and prejudice*, Col. Res. Appl. 35, (2010) p 401-209.
- [XLVI] Sève, R., Ronchi, L.R., *Physique de la couleur : de l'apparence colorée à la technique colorimétrique*, Masson, Paris (1996).
- [XLVII] Smet, K. et Al, *CRI2012: A proposal for updating the CIE colour rendering index*, Light. Res. Technol. 0, (2012) p 1-21.
- [XLVIII] Smet, K., Ryckaert, W.R., Pointer, M.R., Deconinck, G., Hanselaer, P., *Memory colours and colour quality evaluation of conventional & SSL lamps*, Opt. Express 18, (2010) p. 26229-26244.
- [XLIX] Smet, K., Ryckaert, W.R., Pointer, M.R., Deconinck, G., Hanselaer, P., *Colour Appearance rating of familiar real objects*, Col. Res. Appl. 36, (2011) p 192-200.
- [L] Smet, K., Ryckaert, W.R., Pointer, M.R., Deconinck, G., Hanselaer, P., *Correlation between colour quality metric predictions & visual appreciation of light sources*, Opt. Express 19, (2011) p. 8151-8166.
- [LI] Smet, K., Ryckaert, W.R., Pointer, M.R., Deconinck, G., Hanselaer, P., *Optimal color quality of LED cluster based on memory colours*, Opt. Express 19, (2011), p. 6903-6912.
- [LII] Smet, K., Ryckaert, W.R., Pointer, M.R., Deconinck, G., Hanselaer, P. *Optimisation of colour quality of LED lighting with reference to memory colours*, Lighting Research Technology, (2012).
- [LIII] Smet, K., Whitehead, L., *Mate-standards for color rendering metrics and implications for sample spectral sets*, Society for imaging Science and technology, (2011).
- [LIV] Szabo, F., Bodrogi, P., Zilzi, I., Schanda, J., *Experimental modeling of Colour Harmony*, Col. Res. Appl. 35, (2010) p 34-49.
- [LV] Szabo, F., Bodrogi, P., Zilzi, I., Schanda, J., *A colour harmony rendering index based on predictions of colour harmony impression*, Lighting Res. Technol. 41, (2009) p 165-182.
- [LVI] Szabo, F., Bodrogi, P., Zilzi, I., Schanda, J., *Visual experiment on colour rendering harmony : a formula and a rendering index*, available online through <http://cie2.nist.gov/TC1-69/>....
- [LVII] Thorton, W. A., *Validation of the color preference index*, J. Illum. Eng. Soc. 4, (1974) p. 48-52.

- [LVIII] Thornton, W. A. *Color-discrimination index*, J. Opt. Soc. Am. 62, (1972) p 191-194.
- [LIX] UNI 10530, *Principles of visual ergonomics. Lighting of work systems*.
- [LX] UNI 10840, *Light and lighting. School rooms . General criteria for the artificial and natural lighting*.
- [LXI] UNI 11165, *Light and lighting Interior lighting Evaluation of the discomfort glare using the glare rating method (UGR)*.
- [LXII] UNI EN 12464-1, *Light and lighting Lighting of work places Part 1: Indoor work places*.
- [LXIII] Valeur, B., *Lumière et luminescence*, Belin. Paris (2005).
- [LXIV] Wright, W.D., *A re-determination of the trichromatic coefficients of the spectral colours*, Trans. Opt. Soc. London 30, p 141-164 (1928–29)
- [LXV] Xu, H., *Colour rendering capacity and luminous efficiency of a spectrum*, Light.Res. Technol. 25, (1993)p 131-132.
- [LXVI] Yaguchi, H., Takahashi, Y., Shioiri, S., *A proposal of color rendering index based on categorical color names*, Int. Lightning Congress Istanbul, (2001), Vol. II,.
- [LXVII] Yaguchi, H., Endoh, N., Moriyama, T., Shioiri, S., *Categorical color rendering of LED light sources*, CIE Expert Symposium on LED Light Sources, Tokyo, (2004).
- [LXVIII] Yaguchi, H., *Color categories in various colour spaces*, presentation 9<sup>th</sup> CIC Scottsdale, (2001).
- [LXIX] Zukauskas, A. et al., *Statistical Approach to colour quality of solid-state lamps*, IEEE journal of selected topics in quantum electronics, (2009)vol n°6.
- [LXX] Zukauskas, A. et al., *Colour rendition properties of solid-state lamps*, Journal of physics D: applied physics 43 (2010).
- [LXXI] site internet de bioinformatics à l'adresse: <http://www.bioinformatics.org/oeil-couleur/dossier/lumiere.html>



## Sources des figures

Figure 1	consulté sur internet	<a href="http://www.educonline.net">www.educonline.net</a>
Figure 2	consulté sur internet	<a href="http://fr.wikipedia.org">fr.wikipedia.org</a>
Figure 3	consulté sur internet	<a href="http://www.indesciences.com">www.indesciences.com</a>
Figure 4	consulté sur internet	<a href="http://kartable.fr">kartable.fr</a>
Figure 5	consulté sur internet	<a href="http://philippe.boeuf.pagesperso-orange.fr">philippe.boeuf.pagesperso-orange.fr</a>
Figure 6	consulté sur internet	<a href="http://addis.fr">addis.fr</a>
Figure 7	consulté sur internet	<a href="http://indoorpotager.blogspot.com">indoorpotager.blogspot.com</a>
Figure 8	consulté sur internet	<a href="http://www.konicaminolta.com">www.konicaminolta.com</a>
Figure 9	adapté depuis internet	<a href="http://profil-couleur.com">profil-couleur.com</a>
Figure 10	consulté sur internet	<a href="http://ac-grenoble.fr">ac-grenoble.fr</a>
Figure 11	consulté sur internet	<a href="http://solutions.borderstates.com">solutions.borderstates.com</a>
Figure 12	consulté sur internet	
Figure 13	consulté sur internet	<a href="http://fr.wikipedia.org">fr.wikipedia.org</a>
Figure 14	consulté sur internet	<a href="http://cinenow.fr">cinenow.fr</a>
Figure 15	consulté sur internet	<a href="http://daltonisme2011.comze.com">daltonisme2011.comze.com</a>
Figure 16	consulté sur internet	<a href="http://fr.wikipedia.org">fr.wikipedia.org</a>
Figure 17	consulté sur internet	<a href="http://maxicours.com">maxicours.com</a>
Figure 18	tiré d'une présentation de Michel Aubes trouvé sur	<a href="http://slideplayer.fr">http://slideplayer.fr</a>
Figure 19	consulté sur internet	<a href="http://fr.wikiversity.org">fr.wikiversity.org</a>
Figure 20	consulté sur internet	<a href="http://en.wikipedia.org">en.wikipedia.org</a>
Figure 21	consulté sur internet	<a href="http://the-print-guide.blogspot.com">the-print-guide.blogspot.com</a>
Figure 22	consulté sur internet	
Figure 23	réalisation personnelle	
Figure 24	consulté sur internet	
Figure 25	réalisation personnelle	
Figure 26	consulté sur internet	



Figure 27	consulté sur internet	tike-luminares.com
Figure 28	consulté sur internet	gr-univers.fr
Figure 29	département of energy, USA	
Figure 30	consulté sur internet	
Figure 31	consulté sur internet	led-development.fr
Figure 32	consulté sur internet	
Figure 33	photo prise par P. Betis	
Figure 34	consulté sur internet	sensing.konicaminolta.asia
Figure 35	consulté sur internet	envidura.com
Figure 36	consulté sur internet	photonicsonline.com
Figure 37	consulté sur internet	sensing.konicaminolta.asia
Figure 38	photo prise par moi-même	
Figure 39	consulté sur internet	emmanuelgeorjon.com
Figure 40	photo prise par moi-même	
Figure 41	réalisation personnelle (image gonio cam)	
Figure 42	réalisation personnelle	
Figure 43	tiré de documentation de Photo Research	
Figure 44		
Figure 45	réalisation personnelle	
Figure 46	image prise au LNE	
Figure 47	images prises au LNE	
Figure 48	images prises au LNE	
Figure 49	réalisation personnelle	
Figure 50	réalisation personnelle	
Figure 51	consulté sur internet	docs.agi32.com
Figure 52	tiré de la thèse de B Coutelier	
Figure 53	photo prise par moi-même	
Figure 54	photo prise par le LNE	
Figure 55	réalisation personnelle	
Figure 56	réalisation personnelle	
Figure 57	réalisation personnelle	
Figure 58	réalisation personnelle	
Figure 59	réalisation personnelle	
Figure 60	réalisation personnelle	
Figure 61	réalisation personnelle	
Figure 62	réalisation personnelle	
Figure 63	réalisation personnelle	
Figure 64	photo prise par moi-même	
Figure 65	réalisation personnelle	
Figure 66	réalisation personnelle	
Figure 67	réalisation personnelle	
Figure 68	STATISTICA 6.0	
Figure 69	STATISTICA 6.0	
Figure 70	réalisation personnelle	
Figure 71	réalisation personnelle	

Figure 72 photo prise par moi-même  
Figure 73 photo prise par moi-même  
Figure 74 photo prise par moi-même  
Figure 75 photo prise par moi-même  
Figure 76 photo prise par moi-même  
Figure 77 photo prise par moi-même  
Figure 78 photo prise par moi-même  
Figure 79 photo prise par moi-même  
Figure 80 réalisation personnelle  
Figure 81 réalisation personnelle  
Figure 82 réalisation personnelle  
Figure 83 réalisation personnelle  
Figure 84 réalisation personnelle (image gonio cam)  
Figure 85 réalisation personnelle (image gonio cam)  
Figure 86 réalisation personnelle (image gonio cam)  
Figure 87 réalisation personnelle (image gonio cam)  
Figure 88 réalisation personnelle (image gonio cam)  
Figure 89 réalisation personnelle (image gonio cam)  
Figure 90 réalisation personnelle (image gonio cam)  
Figure 91 réalisation personnelle  
Figure 92 réalisation personnelle  
Figure 93 statgraphics  
Figure 94 réalisation personnelle  
Figure 95 réalisation personnelle  
Figure 96 réalisation personnelle  
Figure 97 réalisation personnelle  
Figure 98 réalisation personnelle  
Figure 99 réalisation par D. Renoux (LNE)  
Figure 100 réalisation personnelle  
Figure 101 réalisation par D. Renoux (LNE)  
Figure 102 réalisation personnelle  
Figure 103 réalisation personnelle  
Figure 104 réalisation personnelle  
Figure 105 réalisation personnelle  
Figure 106 réalisation personnelle  
Figure 107 réalisation personnelle  
Figure 108 réalisation personnelle  
Figure 109 réalisation personnelle  
Figure 110 réalisation personnelle  
Figure 111 réalisation personnelle  
Figure 112 réalisation personnelle  
Figure 113 réalisation personnelle  
Figure 114 réalisation personnelle  
Figure 115 réalisation personnelle  
Figure 116 réalisation personnelle

Figure 117 réalisation personnelle  
Figure 118 réalisation personnelle  
Figure 119 réalisation personnelle  
Figure 120 réalisation personnelle  
Figure 121 réalisation personnelle  
Figure 122 réalisation personnelle  
Figure 123 réalisation personnelle  
Figure 124 réalisation personnelle  
Figure 125 réalisation personnelle  
Figure 126 réalisation personnelle  
Figure 127 réalisation personnelle  
Figure 128 réalisation personnelle  
Figure 129 réalisation personnelle  
Figure 130 réalisation personnelle  
Figure 131 réalisation personnelle  
Figure 132 réalisation personnelle  
Figure 133 réalisation personnelle  
Figure 134 réalisation personnelle  
Figure 135 réalisation personnelle  
Figure 136 réalisation personnelle  
Figure 137 réalisation personnelle  
Figure 138 réalisation personnelle  
Figure 139 utilisation personnelle d'un programme interne (dev par D. Renoux (LNE))  
Figure 140 réalisation personnelle  
Figure 141 réalisation personnelle  
Figure 142 réalisation personnelle  
Figure 143 consulté sur internet [new-learn.info](http://new-learn.info)  
Figure 144 réalisation personnelle  
Figure 145 réalisation personnelle (image gonio cam)  
Figure 146 photo prise par moi-même  
Figure 147 photo prise par moi-même  
Figure 148 réalisation personnelle  
Figure 149 réalisation personnelle  
Figure 150 réalisation personnelle  
Figure 151 réalisation personnelle  
Figure 152 réalisation personnelle  
Figure 153 réalisation personnelle  
Figure 154 réalisation personnelle  
Figure 155 réalisation personnelle  
Figure 156 réalisation personnelle  
Figure 157 réalisation personnelle

# ANNEXES

Annexe 1 : interface du programme

Calcul d'UGR via carte de luminance

Paramètres de calcul

Chemin...

C:\goniocam\cartes de luminance

Position de la ligne de vue (teta)\* :

2048

Parcourir

Position de la ligne de vue (phi)\* :

2048

Choix de zone

zone ok

Seuil.....

0,2

Go!

\* centre en [2048;2048], [0;0] bas-gauche, [colonne;ligne]

Résultats

Luminance de background calculée :

0

50

Valeur de l'UGR calculée :

0

0

luminance max

0

☐ choix BG

☐ Calcule UGR for white LED

0

☐ Calcule UGR small source ( $LK^2w=>200I^2/R^2$ )

0

☐ Calcule UGR .....

0

☐ calcul spécifique au bureau

Annuler

OK

Gonio & caméra photométrique

Paramètres de l'acquisition caméra PR 905 et goniomètre

radical image

D:\goniocam\sev\A\sevA

fichier information

\*.txt...

angle incrémental rotation (°)

H

15

v

15

nombre d'angles

H

9

v

8

Objectif

graduation

22

☒ 25 mm

☐ 50 mm

Temps intégration

☒ 1

☐ 2

☐ 3

options

gain image finale

2

☐ moyennage

Performance

différences (ng)

0

durée process (s)

0

Corrections

1/ coeff champ horizontal

0,9951

12/ décalage angle image H (°)

0,04

2 / coeff champ vertical

0,9942

13/ décalage angle image V (°)

-0,35

3/ rotation fixe image (°)

0,27

14/ correction de noir

0

4/ perpendicularité (°)

0,0225

uniformité coeff a ( $x^6$ )

0

5/ décalage centre de rotation H

0,003

uniformité coeff b ( $x^4$ )

0

6/ décalage centre de rotation V

0

uniformité coeff b ( $x^2$ )

0

7/ coefficient rotation V

0,9962

position image n°

0

w

H

R

v

8/ offset rotation H (°)

0

☐ optimisation paramètre

1

9/ offset rotation V (°)

0

intervalle

0,01

10/ décalage centre image H

-0,065

nombre de pas

10

11/ décalage centre image V

-0,0298

☐ Calibration uniformité

☐ carte de luminance

CALCUL

OK

**créé une carte de luminance**

Selection :

	ND	Ti 1 (ms)	Ti 2 (ms)	Ti 3 (ms)
<input checked="" type="checkbox"/>	0	10	100	200
<input checked="" type="checkbox"/>	2	10	100	200
<input type="checkbox"/>	4	10	50	100

Chemin du dossier :

C:\goniocam\cartes de luminance\ Parcourir

Calculer Annuler OK

**Calcul d'UGR sur image**

Paramètres d'acquisition - obj 25 mm

graduation objectif

angle visée horizontal (°)

angle visée vertical (°)

temps intégration (ms)

densité (10<sup>-n</sup>)

à 50 ms (NG/(cd/m<sup>2</sup>))

Luminance de fond (cd/m<sup>2</sup>)

noir image

Résultats

UGR

échelle (ugr/NG)

CALCULER

Annuler OK

**CQ11**

Target spectra

OPEN CLEAR LIST  
SET ALL MEASURE

SPD interpolation  
☒ sampling ☐ linear  
☐ cubic

CIE observer xyz  
☒ 2° ☐ 10°

Chromatic Space (I)  
☒ x,y ☐ u,v  
☐ u',v' ☐ a,b (1)

UCS (II)  
☒ U\*v\*w\* ☐ Lab  
☐ IPT (obs. 10°)  
☐ CAM97 ☐ rev  
☐ CAM02  
☐ Yu'v' ☐ Yxy  
☐ XXXXXXX

CAM parameter  
La cd/m<sup>2</sup>   
Yb cd/m<sup>2</sup>   
D (CAT)   
☐ dim surround

CAT&UCS White Point  
☒ TCS ref light (1)  
☐ white ref (2)  
Y level normalisation:  
 cd/m<sup>2</sup>

CAT  
01-Von Kries  
02-CIECAT94  
03-CMCCAT97  
04-CMCCAT2000  
05-CAT02  
06-Integrated/nul

TCS Ref light (1)  
☒ CCT u,v  
☐ chr distance (1)  
☐ white ref (2)  
Daylight - Planckian  
☐ D65 ☐ P4200  
☐ D55 ☐ P3450  
☐ D50 ☐ P2950  
☐ P2700  
limit D/P

Colour processing  
☒ shifts  
☐ areas/gamut 2D  
☐ categories ☐ % ref  
☐ area/gamut 3D  
☐ similarity (no ref. ill)  
☐ harmony distortion

Count  
☒ magnitude ☐ rank  
☐ binary  
threshold  
☒ global   
☐ Chr/sat   
☐ Y/L\*   
☐ Hue   
☐ relative Y/L\* (%)  
☐ ch/satr & L\*/Y  
☐ MacAdam Ellipses  
☐ no chroma sup

Computation  
☒ DE ☐ DE2000  
☐ embedded

Average  
☒ arithmetic ☐ RMS

Config  
N°  list  
name :   
component (n)   
☐ full interface  
Load Save

Weighting  
☐ CCT table  
☐ TCS table

Shift Scaling  
coeff a   
coeff b   
☐ Log scale  
Scale type   
Area scaling  
exponent

general index  
☐ all TCS  
N°1 ->   
selection

interface  
UPDATE command  
EXTRA categories

Results  
colorimetry  
x,y    
CCT (K)   
duv   
x,y refer.

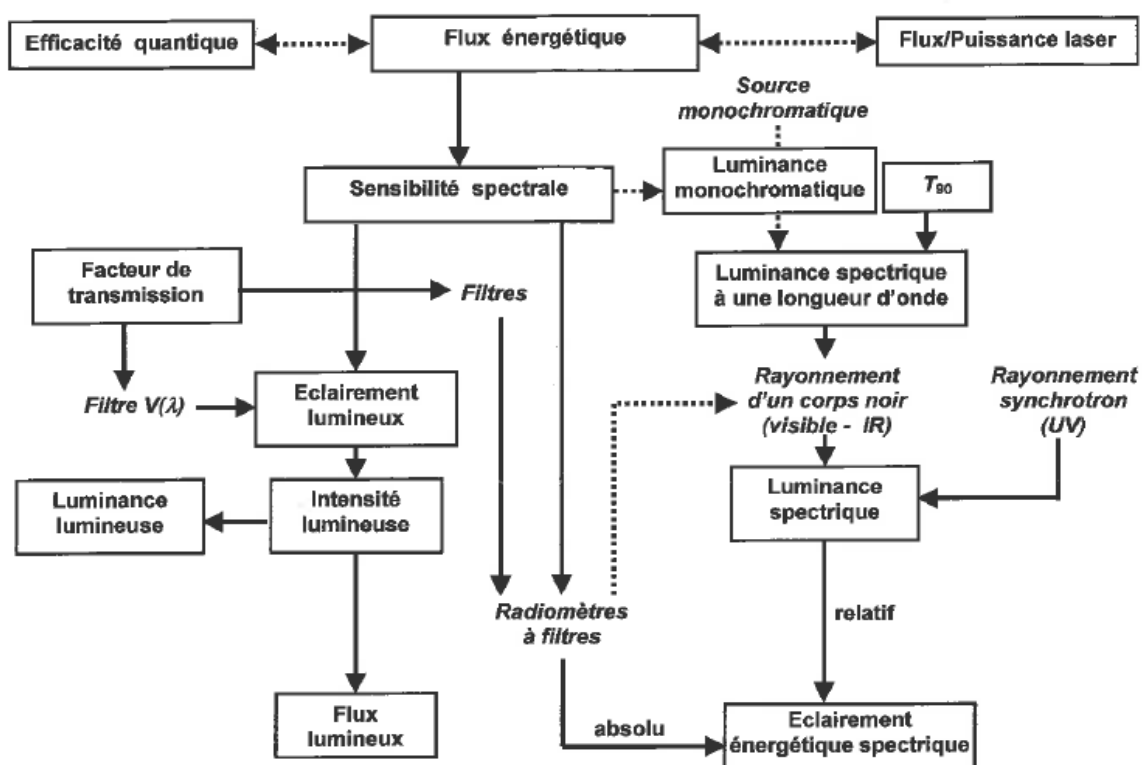
Quality indexes  
☒ interface Compute  
☐ selection :  
☐ 0    
☐ 0    
☐ 0    
☐ 0

Sheet CRV Map Graph

Identification  
date  brand   
ref.  comment

## Métrologie des rayonnements optiques

### Schéma général de traçabilité entre les grandeurs



# Annexe 3: Résultats de l'expérience subjective sur la couleur

Liste complète des séries:

<p><b>A</b> <b>chaud</b></p> <p>1 halogen 2 CFL 3 Toshiba 4 A80 5 RGBY 6 FL</p> <p><b>A</b> <b>froid</b></p> <p>7 nUV 8 RGB 9 Kryona</p>	<p><b>D</b> <b>chaud</b></p> <p>1 CFL 2 halogen 3 Toshiba 4 A80 5 RGBY 6 RGB 7 nUV 8 FL 9 Kryona</p>
<p><b>B</b> <b>chaud</b></p> <p>1 RGBY 2 CFL 3 Toshiba 4 halogen 5 A80 6 Kryona 7 FL 8 RGB 9 nUV</p> <p><b>B</b> <b>froid</b></p>	<p><b>E</b> <b>chaud</b></p> <p>1 A80 2 halogen 3 RGBY 4 Toshiba 5 CFL 6 Kryona 7 FL 8 nUV 9 RGB</p> <p><b>E</b> <b>froid</b></p>
<p><b>C</b> <b>chaud</b></p> <p>1 CFL 2 A80 3 Toshiba 4 RGBY 5 halogen 6 RGB 7 nUV 8 Kryona 9 FL</p> <p><b>C</b> <b>froid</b></p>	<p><b>F</b> <b>chaud</b></p> <p>1 CFL 2 halogen 3 Toshiba 4 A80 5 RGBY 6 RGB 7 nUV 8 FL 9 Kryona</p> <p><b>F</b> <b>froid</b></p>
<p><b>G</b> <b>chaud</b></p> <p>1 RGBY 2 halogen 3 CFL 4 A80 5 Toshiba 6 nUV 7 FL 8 RGB 9 Kryona</p> <p><b>G</b> <b>froid</b></p>	<p><b>H</b> <b>chaud</b></p> <p>1 Toshiba 2 A80 3 CFL 4 RGBY 5 halogen 6 nUV 7 Kryona 8 RGB 9 FL</p> <p><b>H</b> <b>froid</b></p>



Caractéristiques des panelistes:

Paneliste N°	sexe	Age	séries
1	Homme	28	A - B
2	Femme	34	C - A
3	Homme	44	B - C
4	Homme	32	A - B
5	Homme	45	C - A
6	Homme	58	B - C
7	Homme	29	D - E
8	Femme	42	F - D
9	Femme	43	E - F
10	Femme	39	D - E
11	Homme	42	F - D
12	Homme	60	E - F
13	Homme	45	A - F
14	Femme	29	B - E
15	Femme	51	C - D
16	Femme	42	A - D
17	Femme	31	B - F
18	Femme	48	A - D
19	Femme	54	C - B
20	Femme	55	C - E
21	Femme	41	E - F
22	Homme	34	A - B
23	Homme	30	C - D
24	Homme	61	E - F
25	Homme	30	A - F
26	Homme	48	B - E
27	Homme	27	C - D
28	Femme	27	B - A
29	Homme	43	F - E
30	Femme	43	D - C
31	Homme	55	B - A
32	Homme	32	F - E
33	Homme	62	D - C
34	Homme	39	F - E
35	Homme	22	D - C
36	Homme	47	B - A
37	Homme	20	G - H
38	Homme	32	G - H
39	Homme	32	H - G
40	Homme	25	H - G
41	Homme	29	G - H
42	Homme	22	H - G
43	Homme	26	G - H

Résultats subjectifs pour la préférence globale

Sources:	rgb		rgby		nuv		a80		cfl		kryo		hal		FL		tosh	
Série:	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Paneliste N°																		
1	4	4	2	4	2	2	4	4	2	2	3	1	2	2	1	4	3	3
2	2	1	4	1	2	2	4	3	4	3	1	2	4	4	3	1	3	2
3	1	1	4	4	4	3	3	3	2	3	2	3	4	3	2	4	2	3
4	2	2	4	3	3	3	4	3	4	4	3	3	3	4	2	4	3	4
5	2	1	3	3	2	2	4	3	4	4	2	4	3	3	2	2	3	4
6	1	1	3	4	4	3	3	3	4	4	2	4	4	4	3	3	3	5
7	3	2	2	3	4	4	3	4	4	5	3	3	5	3	3	4	3	4
8	1	1	1	4	3	2	2	2	2	1	1	2	2	3	4	2	2	4
9	2	2	3	4	4	4	3	3	4	3	2	3	4	4	3	4	3	4
10	2	3	3	3	4	4	4	3	4	4	4	4	5	4	3	3	3	4
11	2	1	4	4	3	2	4	4	3	3	2	2	3	3	4	3	3	3
12	1	2	5	3	5	5	3	1	5	2	1	5	3	4	4	3	2	4
13	2	2	4	4	3	3	4	5	5	5	3	4	4	4	3	4	4	4
14	1	1	2	3	2	4	4	3	5	3	1	1	3	4	4	3	2	3
15	2	2	4	4	5	4	3	3	3	3	4	5	4	4	4	4	3	3
16	3	4	3	4	5	3	4	4	3	3	4	5	3	3	4	4	2	2
17	2	4	3	5	5	4	3	5	4	2	1	5	4	4	4	5	5	4
18	2	3	2	4	2	4	3	3	4	3	3	4	3	4	2	3	3	3
19	2	3	4	4	2	2	2	4	2	3	2	2	3	3	2	2	3	2
20	2	2	4	4	5	5	4	2	2	5	3	3	4	4	4	5	4	5
21	1	2	5	3	4	4	4	3	4	2	4	3	4	3	4	4	2	4
22	1	1	2	2	3	3	4	3	2	5	5	3	3	3	5	4	3	4
23	1	1	3	2	2	2	3	5	2	3	1	2	4	4	1	3	2	3
24	1	2	4	4	3	4	3	4	2	3	2	3	3	4	4	4	3	3
25	2	2	3	5	2	4	5	4	5	3	3	3	4	5	2	5	5	4
26	1	1	5	4	3	3	2	3	4	4	2	2	3	5	2	1	4	3
27	5	5	4	5	2	4	4	4	3	3	4	4	3	4	4	4	2	3
28	3	4	3	3	5	5	3	4	5	4	5	5	4	3	5	5	3	3
29	2	2	4	3	5	3	3	4	3	5	4	2	4	4	4	3	3	3
30	2	1	3	2	1	1	4	4	5	3	1	1	4	1	3	3	5	2
31	4	4	4	4	3	3	5	4	5	3	2	3	5	2	3	3	4	3
32	2	3	3	4	3	3	3	3	4	3	2	2	4	4	3	3	2	3
33	3	3	4	4	4	4	5	4	4	4	5	4	4	5	5	4	3	5
34	1	1	5	5	5	4	5	5	4	5	3	1	5	5	5	2	4	3
35	5	2	2	2	4	4	3	1	2	2	2	3	3	3	3	4	2	2
36	4	3	3	4	3	4	3	3	4	2	3	4	4	3	3	4	3	1
37	3	2	3	4	3	3	3	4	3	3	3	3	4	5	3	4	4	4
38	2	2	3	3	3	5	2	4	5	5	4	3	4	4	4	3	3	3
39	1	2	5	3	3	5	3	3	4	5	3	3	5	4	4	5	3	5
40	2	4	3	2	5	5	4	2	2	3	4	2	4	3	4	4	2	4
41	3	2	3	2	3	4	4	3	4	4	2	2	4	4	4	3	2	2
42	3	2	3	5	2	2	2	4	4	4	2	1	3	3	2	1	4	3
43	5	5	5	4	5	5	4	5	5	5	4	4	5	5	5	5	4	4

Résultats subjectifs pour la fidélité des couleurs

Sources:	rgb		rgby		nuv		a80		cfl		kryo		hal		FL		tosh	
Série:	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Paneliste N°																		
1	1	1	2	4	4	4	4	4	4	4	2	3	3	2	4	3	3	3
2	1	1	3	4	2	3	3	4	4	3	1	3	3	3	3	2	3	2
3	1	1	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
4	2	2	4	3	3	4	4	3	3	3	4	4	3	4	3	4	3	4
5	3	2	4	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	3	2	4	4
6	1	1	4	3	5	3	3	3	3	2	2	4	4	5	3	2	4	4
7	2	1	3	3	5	5	3	4	4	4	3	4	5	4	3	4	4	4
8	3	3	4	3	4	4	5	2	4	5	4	2	4	4	4	3	5	4
9	2	2	3	4	4	4	4	3	4	3	3	4	4	4	4	4	3	4
10	2	2	4	3	4	3	4	3	4	4	3	4	5	4	4	4	4	3
11	2	2	3	4	3	3	5	4	4	4	3	3	3	4	4	3	3	3
12	1	2	4	3	5	5	4	0	5	2	2	5	3	4	4	3	2	5
13	4	4	4	4	4	4	4	5	5	5	4	4	4	4	4	4	4	4
14	1	1	3	4	3	5	3	1	4	5	4	5	3	4	3	3	3	4
15	2	2	3	4	4	4	3	3	3	3	4	4	4	3	3	4	4	4
16	3	4	3	4	5	3	4	4	3	2	4	5	3	3	4	4	3	3
17	1	2	4	4	5	4	4	5	5	3	4	5	5	4	5	5	5	5
18	2	2	3	4	3	4	4	4	4	3	3	4	4	5	3	4	4	4
19	2	3	4	4	2	2	3	4	3	4	2	2	3	3	2	2	3	2
20	2	2	3	4	4	5	4	3	3	5	5	4	4	4	4	4	5	5
21	1	2	4	4	4	4	3	3	4	3	5	4	4	4	5	4	3	3
22	2	2	3	3	3	4	4	4	3	4	4	3	4	3	4	4	4	4
23	1	2	2	2	2	4	4	5	4	4	3	3	4	4	2	4	3	4
24	1	2	4	4	3	4	2	3	2	3	2	3	3	3	4	4	3	3
25	2	3	4	5	3	4	5	5	5	4	3	3	3	5	3	5	5	5
26	3	1	4	4	4	3	2	4	4	4	2	2	3	5	4	2	5	3
27	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
28	3	4	4	3	5	5	3	4	5	4	5	5	5	3	5	5	3	4
29	3	1	4	3	4	4	3	3	4	4	4	2	4	4	4	3	4	4
30	2	1	4	2	3	2	4	4	4	3	1	2	4	2	2	1	4	2
31	3	4	3	3	3	2	5	4	5	3	2	3	5	3	3	3	4	3
32	5	3	4	4	4	4	4	4	4	3	3	3	4	4	4	4	3	4
33	3	4	4	5	4	4	4	5	4	3	5	4	4	5	5	4	3	5
34	2	1	5	5	5	5	5	5	4	5	3	2	5	5	5	4	5	5
35	5	2	2	4	4	3	4	3	3	4	2	2	3	3	3	4	2	3
36	2	2	3	4	4	4	3	3	4	3	4	4	4	4	3	4	5	2
37	3	2	4	4	4	5	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
38	2	2	3	4	4	5	3	4	5	5	4	4	4	4	4	4	4	4
39	2	3	4	4	3	5	3	4	3	5	2	4	5	5	4	5	2	5
40	2	2	3	2	4	4	4	2	3	4	4	3	3	3	3	4	2	4
41	1	2	2	3	3	5	4	3	3	4	2	2	3	4	4	3	3	3
42	4	5	4	2	4	4	4	3	4	3	3	2	3	3	3	3	2	4
43	5	5	5	5	5	5	5	5	4	5	4	5	5	5	5	5	5	5

Résultats subjectifs pour la qualité de la vivacité des couleurs

Sources:	rgb		rgby		nuv		a80		cfl		kryo		hal		FL		tosh		
Série:	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	
Paneliste N°																			
	1	5	5	4	4	1	1	3	4	2	2	1	1	1	2	3	3	2	1
	2	2	1	4	4	3	3	3	4	3	3	2	3	3	3	3	2	3	2
	3	1	1	3	3	2	2	2	2	2	3	1	2	2	2	2	2	2	2
	4	1	1	3	3	2	4	4	2	3	4	2	3	2	4	4	4	4	3
	5	5	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	3	3	3	3	4
	6	5	4	3	5	3	2	4	3	4	2	2	3	4	4	3	3	3	4
	7	4	3	3	3	3	4	3	4	3	5	3	3	4	4	0	3	3	4
	8	4	5	1	4	2	3	2	2	2	1	2	2	2	4	2	2	2	3
	9	5	5	3	3	4	3	3	4	4	3	3	2	4	4	3	3	3	3
	10	3	2	4	3	4	4	4	3	4	4	4	3	4	4	3	4	3	3
	11	2	2	4	4	2	2	5	5	3	4	1	3	4	4	4	3	3	3
	12	1	2	5	3	5	4	3	2	5	2	3	5	3	4	4	3	2	5
	13	4	4	3	3	4	4	3	5	4	4	3	4	3	4	4	4	3	4
	14	4	4	3	4	3	3	4	3	3	4	4	4	2	4	3	3	2	3
	15	0	2	2	3	4	3	2	4	3	4	3	4	3	4	3	3	3	3
	16	3	3	3	3	5	3	3	3	3	3	3	5	3	3	4	3	2	2
	17	1	3	4	5	4	4	4	4	4	3	5	4	4	4	4	4	4	4
	18	2	2	2	3	2	4	3	3	4	2	2	3	4	4	2	3	3	3
	19	2	3	4	4	2	2	3	3	4	3	2	2	3	3	2	2	3	2
	20	2	2	4	4	5	5	4	3	4	5	3	4	3	4	4	5	4	5
	21	1	1	4	2	4	4	2	4	4	4	4	3	3	4	4	4	2	4
	22	4	4	3	4	3	2	3	4	3	4	4	3	2	2	4	3	2	3
	23	1	1	4	2	2	3	4	4	2	3	1	2	2	4	2	2	1	3
	24	1	2	4	2	2	3	4	3	2	3	1	2	4	4	3	3	3	3
	25	2	2	2	5	2	2	4	4	5	4	2	2	4	5	2	5	4	4
	26	5	3	4	4	3	3	4	4	3	4	2	3	2	5	1	2	4	2
	27	5	5	4	5	2	3	3	4	2	4	2	4	3	4	3	2	2	2
	28	4	4	4	3	4	5	4	5	3	4	5	4	4	4	5	4	3	4
	29	3	5	4	3	4	3	3	4	3	5	3	3	4	4	4	3	3	3
	30	5	5	3	4	2	4	3	3	4	2	2	1	5	2	2	3	4	3
	31	4	5	2	3	3	2	5	3	2	3	2	3	4	2	3	2	2	2
	32	5	5	3	4	3	3	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	33	3	3	4	4	4	5	3	3	3	4	5	3	5	5	5	3	3	5
	34	1	1	5	5	5	4	5	4	4	5	3	1	5	5	5	2	3	3
	35	5	2	2	4	2	2	4	4	2	3	2	1	3	4	1	5	1	1
	36	5	5	4	4	4	4	2	3	3	3	4	4	4	4	3	3	2	2
	37	5	5	4	4	5	5	4	4	3	3	4	4	4	4	4	4	3	4
	38	2	2	3	4	3	5	2	4	5	5	4	2	2	4	4	4	3	3
	39	3	4	5	4	3	5	5	3	5	5	2	3	4	5	4	5	4	5
	40	5	5	3	2	3	4	4	3	1	2	2	3	4	4	4	3	2	3
	41	4	4	4	4	2	3	4	4	3	3	2	4	4	3	3	2	3	3
	42	5	5	4	3	3	3	3	4	4	3	3	2	3	3	3	2	2	2
	43	5	5	5	5	5	3	5	5	4	4	3	3	5	4	5	4	4	5

Résultats subjectifs pour le naturel des couleurs

Sources:	rgb		rgby		nuv		a80		cfl		kryo		hal		FL		tosh	
Série:	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Paneliste N°																		
1	2	2	3	4	3	2	4	5	3	2	2	2	4	4	3	4	2	3
2	1	1	3	4	3	3	3	4	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2
3	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	2	4	3	3	3	3	3	3
4	2	2	4	4	3	3	4	3	3	3	3	4	3	4	3	4	3	4
5	2	2	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3	4	4
6	1	1	3	3	4	3	4	2	3	3	2	3	4	4	4	0	4	4
7	1	1	2	3	4	4	3	3	4	5	3	3	4	4	3	4	5	4
8	1	1	1	3	3	3	3	2	3	5	4	2	4	5	4	2	4	4
9	1	2	4	3	4	4	4	3	4	4	3	3	4	4	3	4	3	4
10	2	2	2	3	5	4	4	3	3	4	3	5	4	4	4	4	4	4
11	2	2	3	4	3	3	4	4	4	4	3	3	4	4	4	4	3	3
12	1	3	4	3	5	5	4	3	5	2	3	5	3	4	4	3	2	4
13	3	3	4	4	3	4	4	5	5	5	4	4	5	5	3	4	5	4
14	1	1	3	4	3	5	2	3	4	3	4	3	3	4	4	4	2	4
15	2	1	3	4	4	4	3	3	3	3	4	5	4	3	3	4	4	4
16	4	4	3	4	5	4	4	4	3	2	4	5	2	3	4	4	2	2
17	1	2	3	5	5	5	4	4	5	3	4	5	5	4	5	5	5	5
18	2	3	3	4	2	4	4	4	4	3	4	4	3	4	3	4	4	4
19	2	3	3	4	2	3	3	4	3	4	2	2	3	3	2	2	3	2
20	2	2	3	4	5	5	4	2	3	4	4	4	3	4	5	5	5	5
21	1	1	4	3	4	4	3	3	4	3	5	3	4	4	4	4	3	4
22	1	1	2	3	3	4	4	3	3	4	4	3	4	3	4	4	4	4
23	2	1	4	1	3	4	4	5	4	3	2	4	4	4	4	4	4	4
24	1	1	4	3	4	4	3	4	2	2	2	3	3	3	4	4	3	3
25	2	2	5	5	3	3	4	5	5	4	3	3	4	5	3	5	5	5
26	2	1	4	5	4	3	2	4	5	4	3	2	3	5	3	3	4	3
27	2	1	2	2	4	4	3	4	4	3	4	5	4	3	4	4	4	3
28	3	4	3	3	5	5	3	5	5	4	4	5	4	4	5	4	4	4
29	3	2	4	3	5	4	3	4	4	5	4	3	4	4	4	4	4	4
30	1	1	4	2	0	1	4	4	4	2	1	1	4	3	2	3	4	3
31	2	3	2	3	2	2	5	3	4	3	2	2	5	2	2	2	3	2
32	5	3	4	4	4	4	4	4	3	4	4	3	4	4	4	4	3	4
33	3	4	4	4	3	4	3	3	4	4	5	4	4	4	4	4	3	5
34	2	1	5	5	5	5	4	4	4	5	4	2	5	5	5	4	5	5
35	5	1	2	3	4	4	3	2	2	2	2	3	2	3	2	5	1	2
36	2	2	3	4	4	4	3	3	4	3	4	4	4	3	4	4	3	3
37	3	3	4	3	4	4	4	4	4	4	5	5	4	4	5	4	4	4
38	4	2	3	3	4	5	2	4	5	5	4	4	4	4	4	4	4	4
39	2	2	4	3	4	5	4	3	3	5	2	4	4	4	4	5	4	5
40	2	1	2	2	2	4	3	2	2	3	4	4	3	4	3	4	3	4
41	2	2	3	4	2	4	4	3	3	4	2	2	4	4	3	3	3	3
42	4	2	3	3	3	5	4	4	3	3	3	3	4	4	3	2	2	3
43	5	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5

Résultats subjectifs pour le naturel fruits & légumes

Sources:	rgb		rgby		nuv		a80		cfl		kryo		hal		FL		tosh	
Série:	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Paneliste N°																		
1	1	1	3	4	4	4	5	5	3	1	2	2	4	4	3	5	2	3
2	2	1	3	4	3	3	3	3	4	3	3	3	3	3	3	3	2	2
3	1	1	4	4	4	3	3	3	3	3	4	3	4	4	3	4	4	4
4	1	2	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4	3	4	4	3	4	4
5	2	2	3	3	3	3	4	4	4	4	3	4	4	4	3	3	4	4
6	1	1	2	2	4	3	4	2	3	2	1	3	4	4	4	2	4	4
7	1	1	2	2	5	5	4	4	3	3	3	3	5	4	4	4	5	4
8	1	1	1	3	4	4	5	3	3	5	4	3	4	5	4	2	5	4
9	2	2	3	3	4	4	4	3	4	4	4	4	4	4	4	3	3	4
10	2	2	3	2	5	4	4	3	2	4	3	4	4	4	4	4	3	3
11	2	1	3	5	3	3	4	4	4	4	3	3	3	4	4	4	4	3
12	1	2	5	3	5	5	4	3	5	2	3	5	3	4	4	2	2	4
13	2	2	4	4	4	3	4	5	5	5	4	4	5	5	4	4	4	5
14	1	1	2	3	4	5	3	2	4	5	4	5	4	4	4	5	3	4
15	1	1	2	4	4	4	3	3	4	3	4	4	4	4	3	4	4	4
16	3	3	3	3	5	3	3	3	3	2	4	5	3	3	4	4	2	2
17	1	2	3	5	5	5	4	5	5	4	4	5	4	4	5	5	5	5
18	2	2	3	4	3	4	4	3	4	3	4	4	4	5	3	4	4	4
19	3	2	4	4	3	3	4	4	4	4	4	3	4	4	4	3	4	3
20	1	3	2	4	5	5	5	4	4	5	4	4	4	5	5	5	5	5
21	1	1	4	4	4	4	4	3	4	2	3	4	4	3	4	4	3	4
22	2	2	3	2	4	4	4	4	3	4	4	4	4	4	5	4	4	4
23	1	1	4	1	3	4	4	5	5	3	2	4	4	4	4	4	4	5
24	1	1	3	3	4	4	2	4	3	3	2	3	3	3	4	4	3	3
25	2	2	5	5	2	5	5	5	4	5	3	3	4	5	4	5	5	5
26	2	2	4	4	4	3	2	3	5	4	3	2	3	5	3	2	4	4
27	2	1	3	3	4	4	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3
28	2	3	4	4	5	5	3	5	5	4	4	5	5	3	5	4	4	3
29	2	1	4	3	4	5	4	3	3	5	3	3	4	4	4	4	4	4
30	2	1	4	3	2	2	4	5	4	2	1	1	4	3	1	4	4	3
31	2	2	3	3	2	2	5	4	5	4	2	2	4	4	2	2	4	3
32	5	4	4	4	4	4	4	4	3	4	4	3	3	4	4	3	3	3
33	3	3	5	4	3	3	4	4	5	5	3	3	4	4	5	4	4	4
34	1	1	5	5	5	5	4	5	5	5	5	3	5	5	5	5	5	5
35	5	1	3	4	3	4	4	3	2	3	1	1	3	4	2	4	1	1
36	2	2	4	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	4	4	4	3
37	2	2	5	3	4	4	4	4	5	5	5	4	4	4	4	4	5	5
38	2	2	3	2	4	5	2	4	5	5	4	3	4	4	5	4	5	4
39	1	1	4	2	3	5	3	3	3	5	3	3	5	4	4	5	2	4
40	1	1	3	3	4	4	4	2	2	2	3	3	3	3	4	4	2	4
41	1	1	2	2	3	5	3	3	4	4	3	2	3	4	3	4	2	4
42	3	2	2	4	4	3	4	5	3	4	2	2	4	3	3	3	3	2
43	5	4	5	5	4	5	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5

Résultats subjectifs pour le naturel de la peau

Sources:	rgb		rgby		nuv		a80		cfl		kryo		hal		FL		tosh	
Série:	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Paneliste N°																		
1	1	1	4	4	2	2	4	4	2	2	2	2	4	4	2	4	3	3
2	1	0	4	4	3	3	3	4	4	3	3	3	3	3	2	3	2	3
3	1	1	3	3	3	2	2	3	2	2	2	0	3	3	3	4	3	3
4	2	2	4	3	3	3	4	3	4	3	3	3	3	4	3	3	3	3
5	2	2	3	3	3	3	4	3	4	4	3	4	3	4	2	3	4	4
6	2	2	4	3	3	3	3	3	5	2	1	3	4	4	5	3	4	4
7	2	1	3	3	3	4	4	2	4	3	2	2	3	3	4	3	4	4
8	1	1	2	3	4	4	3	2	3	5	3	0	5	4	3	4	3	3
9	2	2	3	3	4	4	3	3	4	3	3	4	4	4	4	3	3	4
10	5	5	4	4	3	3	4	4	3	4	2	3	4	5	2	4	3	3
11	2	2	4	4	3	3	4	4	4	4	2	2	4	4	4	4	3	4
12	1	2	4	3	5	4	4	3	4	2	2	5	2	4	4	2	2	3
13	3	3	4	4	4	4	4	5	5	4	4	3	4	4	3	4	4	4
14	2	1	2	3	3	5	2	2	4	4	3	3	3	4	4	4	2	3
15	1	1	2	4	4	4	3	2	2	3	3	4	4	4	2	4	4	3
16	4	4	4	4	5	4	4	4	3	3	4	4	4	4	4	4	3	3
17	1	2	4	4	5	4	3	5	4	3	3	5	4	4	4	5	5	5
18	3	3	4	4	2	4	4	4	4	3	2	2	4	4	3	4	3	4
19	3	2	4	3	3	3	3	4	3	3	4	3	3	4	4	3	3	3
20	2	2	3	3	5	5	4	3	2	3	4	4	5	5	5	5	5	5
21	1	1	4	3	4	4	4	3	2	2	4	3	4	4	4	4	3	4
22	2	2	2	2	2	4	4	3	3	3	3	2	4	3	4	4	3	4
23	1	1	4	1	3	4	5	5	3	2	1	2	3	5	3	4	3	4
24	1	2	4	3	3	4	2	3	2	2	2	3	4	4	4	4	4	3
25	2	2	4	5	2	2	4	5	3	3	2	2	4	5	2	4	5	3
26	4	1	4	4	3	3	2	4	3	3	3	2	3	4	2	3	5	3
27	2	1	3	4	4	3	3	2	3	2	4	4	4	3	4	4	3	3
28	4	4	4	4	4	5	4	5	5	4	5	4	5	3	5	5	4	3
29	3	2	4	3	4	3	3	3	3	5	4	2	4	3	4	4	4	4
30	2	1	4	2	1	2	3	5	4	4	1	1	4	3	2	3	4	2
31	3	4	3	3	3	4	4	3	2	2	3	4	5	2	3	4	4	2
32	4	2	4	4	4	3	3	4	4	3	3	3	3	3	4	4	3	3
33	5	5	4	5	5	4	4	4	3	3	4	3	4	4	4	5	3	4
34	2	1	5	5	5	5	5	4	4	5	4	2	5	5	5	4	5	5
35	3	1	2	1	5	5	4	2	1	1	1	1	4	4	2	5	2	2
36	0	2	3	3	5	4	3	2	4	2	4	4	4	2	5	4	5	3
37	2	3	5	5	4	4	5	5	5	5	4	4	5	5	5	4	5	5
38	2	2	3	3	3	5	2	4	5	5	4	3	4	4	5	4	4	4
39	1	2	5	4	3	5	3	5	2	4	3	3	5	5	4	5	3	5
40	1	1	3	3	2	4	3	3	2	2	2	2	4	4	4	3	4	4
41	2	1	3	0	2	4	3	3	3	4	2	2	4	4	3	3	2	3
42	2	1	5	3	5	5	4	4	3	2	4	4	4	4	5	3	3	4
43	4	4	4	5	4	5	5	5	4	4	4	4	4	5	4	5	4	4

Résultats subjectifs pour le naturel des plantes

Sources:	rgb		rgby		nuv		a80		cfl		kryo		hal		FL		tosh	
Série:	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Paneliste N°																		
1	3	3	2	4	2	2	4	4	4	3	2	3	4	4	3	4	2	3
2	4	5	3	3	2	3	3	3	3	4	3	3	3	3	3	3	3	3
3	2	2	4	3	3	3	4	3	2	2	3	4	4	3	4	3	2	3
4	3	3	3	3	2	3	4	3	4	4	3	4	3	4	3	3	3	3
5	2	2	3	3	3	3	4	3	4	4	3	4	3	4	3	3	4	4
6	3	3	2	3	3	3	2	1	4	2	3	4	3	4	3	4	4	4
7	2	2	3	4	4	4	3	3	3	4	3	3	4	4	4	4	5	3
8	2	4	3	4	3	3	3	3	4	5	4	2	3	5	4	2	3	2
9	3	2	4	4	4	4	3	3	3	4	3	4	4	4	4	3	3	3
10	2	4	3	3	4	3	4	4	3	4	3	3	4	4	3	4	3	3
11	3	3	3	4	3	4	5	4	4	4	4	3	4	4	4	4	3	4
12	1	2	4	3	5	5	3	2	5	2	2	5	2	3	3	2	2	4
13	2	2	4	4	4	3	4	5	4	5	4	4	4	4	4	4	4	4
14	2	2	4	4	4	5	3	3	4	3	4	4	3	5	5	5	4	4
15	2	2	3	4	4	4	3	2	4	3	4	4	4	3	3	4	4	4
16	3	4	3	3	5	3	3	4	3	2	4	5	3	3	4	4	2	2
17	2	3	4	5	5	5	4	5	4	3	4	5	5	4	5	5	5	5
18	2	2	2	4	3	4	3	4	4	3	4	3	3	4	2	3	3	3
19	3	3	4	4	3	3	3	4	2	3	4	3	3	4	4	3	3	3
20	4	4	4	3	4	4	5	4	3	4	5	3	4	4	5	5	5	5
21	3	3	4	4	5	3	4	4	5	2	5	3	4	3	3	4	4	3
22	3	3	3	2	3	4	4	3	2	3	4	4	4	2	4	4	0	4
23	2	1	4	2	3	4	4	5	4	3	2	3	4	5	4	4	5	4
24	3	3	4	3	3	3	2	3	2	3	3	3	3	3	3	4	3	3
25	2	2	5	5	3	4	4	5	5	4	3	3	4	5	3	5	5	5
26	4	3	4	4	3	3	3	3	4	3	2	2	3	5	2	2	3	4
27	2	1	4	4	4	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3
28	5	4	4	4	5	5	3	5	5	4	3	4	4	4	5	5	4	4
29	2	1	4	4	4	4	4	3	4	4	4	3	4	4	4	4	4	3
30	5	5	4	4	1	3	3	4	4	4	1	4	4	2	2	3	4	2
31	4	4	4	4	4	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	4
32	5	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	4	4	4	4	3	4
33	4	3	4	3	2	3	3	4	4	4	4	4	3	4	4	4	3	3
34	2	1	5	5	5	5	5	5	5	5	4	2	5	5	5	5	5	5
35	4	3	2	4	4	3	4	3	4	4	2	4	3	5	4	5	3	3
36	4	4	3	3	4	4	3	4	4	2	4	3	4	3	3	4	4	2
37	2	2	4	5	4	4	5	4	4	5	5	4	4	5	4	4	5	4
38	4	2	3	3	3	5	2	4	5	5	4	3	4	4	4	4	3	3
39	3	3	4	3	3	5	3	5	2	5	3	4	5	5	4	5	2	5
40	4	3	2	2	2	4	4	2	2	2	5	2	2	3	3	3	2	3
41	2	2	3	3	3	3	3	4	5	4	3	3	3	3	4	3	2	3
42	4	4	4	3	5	3	3	4	4	4	4	3	3	4	3	3	4	3
43	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	4	5	5	5	5	5



Résultats subjectifs pour le rendu de la charte couleur

Sources:	rgb		rgby		nuv		a80		cfl		kryo		hal		FL		tosh	
Série:	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Paneliste N°																		
1	2	2	4	4	3	3	4	4	4	3	4	4	3	4	3	3	3	4
2	5	5	4	4	3	3	3	4	3	4	2	3	3	3	2	3	3	3
3	1	1	4	2	3	3	3	3	3	2	2	3	3	3	2	3	3	2
4	2	2	4	3	3	4	3	3	4	4	4	4	3	3	3	4	3	4
5	4	4	4	3	3	4	4	4	4	4	4	4	3	4	3	3	3	4
6	4	3	2	4	4	4	5	2	5	3	1	5	4	5	4	3	5	4
7	4	2	4	4	5	4	3	3	4	5	3	3	3	3	3	3	5	4
8	1	5	2	2	2	4	3	3	5	3	3	3	4	2	3	2	3	2
9	3	2	3	3	4	4	4	3	4	4	3	3	4	4	4	3	3	4
10	4	4	2	3	4	4	3	3	4	3	4	4	4	4	4	4	3	4
11	2	2	4	4	3	3	4	4	4	4	3	4	4	3	4	4	3	4
12	1	2	4	3	5	5	4	2	5	2	2	5	2	4	4	2	2	4
13	3	3	3	3	4	3	4	5	5	5	4	4	5	5	3	3	5	4
14	1	1	2	3	4	5	3	3	3	4	4	4	3	4	4	4	2	4
15	2	2	3	4	4	4	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4
16	4	3	4	4	4	3	4	4	3	3	3	4	4	3	4	4	3	3
17	3	2	4	5	5	4	4	5	5	4	4	5	4	4	5	5	5	5
18	2	2	2	2	2	3	3	2	4	3	2	4	3	2	2	2	3	2
19	3	2	4	4	3	2	4	4	4	4	3	2	4	4	3	2	4	3
20	4	5	3	4	4	5	5	4	2	4	4	4	4	4	4	4	4	5
21	5	4	4	4	4	3	4	4	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4
22	2	3	3	4	3	3	3	3	4	3	4	3	4	4	4	3	5	4
23	3	1	3	3	4	4	4	5	5	3	3	4	4	5	3	4	3	4
24	2	2	2	3	3	3	2	3	3	2	3	4	3	2	4	4	4	3
25	2	3	5	5	4	5	4	5	5	4	4	4	3	5	4	5	5	4
26	5	4	4	5	3	3	5	4	4	4	3	2	3	5	3	2	5	3
27	5	4	5	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
28	4	3	5	4	4	5	4	4	5	4	5	5	4	4	5	5	4	3
29	4	5	4	4	4	4	4	4	4	5	4	4	4	4	4	4	4	4
30	2	1	4	4	2	4	3	5	4	4	1	4	4	4	1	4	4	4
31	4	5	5	4	5	4	4	4	4	3	4	4	5	3	4	4	4	4
32	4	4	3	3	3	3	4	3	3	4	3	3	4	3	3	4	4	3
33	4	4	5	5	4	4	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
34	3	1	5	5	5	5	5	5	5	5	4	2	5	5	5	4	4	5
35	3	1	1	2	4	4	3	2	4	2	1	1	2	3	3	4	2	3
36	4	2	4	3	4	3	4	3	4	2	3	2	4	3	3	2	4	2
37	3	3	5	5	5	5	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
38	4	4	4	4	4	5	3	4	5	5	4	4	4	4	4	4	4	4
39	2	2	4	4	3	5	4	5	4	4	3	5	5	4	3	5	3	4
40	2	2	5	2	4	4	3	2	2	3	3	4	3	4	4	3	3	3
41	2	1	2	4	3	3	4	3	4	4	3	2	3	3	4	4	2	3
42	4	5	5	3	5	4	3	3	4	4	4	3	3	4	4	4	2	2
43	3	4	5	5	4	5	4	5	5	5	4	5	4	5	4	5	4	4

# Annexe 4 : Résultats de l'expérience subjective sur le confort visuel

Caractéristiques des panelistes :

Paneliste N°	matin / apres midi	age	sexe	couleur des yeux
1	MORNIG	24	F	LIGHT
2	MORNIG	20	M	LIGHT
3	MORNIG	46	F	LIGHT
4	AFTERN.	37	M	LIGHT
5	AFTERN.	36	F	LIGHT
6	MORNIG	43	F	DARK
7	MORNIG	52	F	LIGHT
8	MORNIG	51	M	DARK
9	AFTERN.	29	M	DARK
10	AFTERN.	61	M	DARK
11	MORNIG	42	M	LIGHT
12	MORNIG	40	M	DARK
13	AFTERN.	34	M	LIGHT
14	AFTERN.	43	F	LIGHT
15	AFTERN.	54	F	LIGHT
16	MORNIG	52	F	DARK
17	MORNIG	39	F	DARK
18	MORNIG	57	M	LIGHT
19	AFTERN.	19	M	LIGHT
20	AFTERN.	54	M	DARK
21	AFTERN.	52	F	DARK
22	MORNIG	34	F	LIGHT
23	AFTERN.	37	F	LIGHT
24	AFTERN.	37	F	DARK
25	AFTERN.	19	M	DARK
26	MORNIG	35	F	LIGHT
27	MORNIG	23	F	DARK
28	MORNIG	23	F	LIGHT
29	MORNIG	22	M	DARK
30	MORNIG	54	F	LIGHT
31	AFTERN.	54	F	LIGHT
32	AFTERN.	43	F	LIGHT
33	AFTERN.	40	F	DARK
34	AFTERN.	24	M	LIGHT
35	AFTERN.	21	M	LIGHT
36	MORNIG	20	M	DARK
37	MORNIG	19	M	DARK
38	AFTERN.	37	F	DARK
39	AFTERN.	23	F	DARK
40	MORNIG	30	F	LIGHT
41	MORNIG	23	F	DARK
42	MORNIG	24	F	LIGHT
43	MORNIG	62	M	LIGHT
44	AFTERN.	23	M	DARK
45	AFTERN.	43	M	LIGHT
46	MORNIG	29	M	DARK
47	MORNIG	44	F	LIGHT
48	AFTERN.	18	M	DARK
49	AFTERN.	18	M	DARK
50	AFTERN.	18	M	LIGHT

# Expérience sur l'éblouissement : résultats bruts

		Eblouissement										Gêne à la lecture									
Comparaison n°		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Paneliste N°	ordre																				
1	a	2	1	2	4	5	1	5	3	1	4	3	3	2	3	5	2	5	3	2	3
2	b	2	5	2	2	4	5	2	1	5	2	3	3	4	3	2	4	2	3	2	4
3	c	2	2	5	2	3	2	1	5	2	5	3	3	3	3	4	2	3	5	3	5
4	e	2	4	4	1	5	2	2	4	4	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
5	d	4	2	1	4	4	1	4	3	5	1	2	3	5	4	3	5	2	1	4	5
6	b	2	4	4	2	3	2	4	1	5	1	2	4	4	2	3	3	4	2	4	2
7	f	5	2	1	2	1	4	3	5	2	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
8	a	2	2	5	4	2	1	4	2	1	4	3	2	5	3	2	4	3	2	1	4
9	d	2	5	1	4	4	1	4	2	5	1	3	2	1	5	4	1	4	3	5	2
10	c	2	2	4	3	2	1	4	2	2	4	3	3	4	2	2	3	4	3	4	4
11	f	5	1	4	3	2	4	2	5	1	3	2	5	3	3	3	4	3	2	4	3
12	e	3	2	5	1	3	2	2	3	5	3	3	3	3	3	3	3	2	3	5	3
13	c	2	1	5	1	2	2	4	3	2	5	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
14	a	2	1	4	3	4	1	3	5	1	4	2	2	4	3	5	1	3	5	1	4
15	b	2	1	3	2	4	5	2	1	5	1	5	3	3	3	5	4	5	2	4	3
16	f	5	1	2	3	3	2	4	5	4	1	5	2	2	4	3	3	3	4	3	4
17	d	4	2	1	4	4	1	1	4	5	1	4	3	2	3	4	4	2	3	4	4
18	e	2	3	5	1	5	1	4	2	5	1	2	2	4	2	3	2	3	3	5	2
19	c	2	2	4	1	4	2	3	5	1	5	3	3	4	2	3	3	3	5	3	4
20	a	4	3	4	4	5	1	4	5	1	4	3	3	3	4	3	3	3	4	2	3
21	b	2	3	2	2	3	5	2	1	5	1	3	3	3	4	4	5	2	3	5	1
22	d	4	4	1	2	4	2	1	4	5	1	4	4	2	3	4	3	2	4	5	2
23	g	1	5	2	3	5	1	4	1	3	2	2	4	3	3	2	1	4	2	5	2
24	e	1	4	5	2	4	2	2	2	5	2	2	4	5	2	3	3	2	2	5	2
25	f	5	1	5	2	1	5	2	5	2	1	4	2	4	3	1	4	4	5	4	1
26	i	1	4	3	2	4	4	5	1	5	5	3	3	3	3	3	3	3	2	4	3
27	h	5	1	4	5	2	1	4	3	1	5	5	3	3	3	3	2	3	3	2	4
28	k	2	2	3	2	3	3	4	1	3	1	3	2	1	4	2	3	5	2	4	2
29	j	2	2	3	2	4	2	1	4	4	3	3	2	3	2	4	3	4	3	2	3
30	k	4	1	3	4	4	2	5	1	2	3	4	1	3	4	5	2	3	2	3	3
31	i	2	5	2	1	2	4	5	1	5	3	4	5	3	3	2	4	5	1	4	2
32	g	2	5	2	2	5	1	4	1	4	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
33	h	5	1	5	5	2	2	4	2	1	3	2	2	4	2	5	3	3	4	2	4
34	k	4	1	4	4	3	1	5	2	2	4	3	2	4	4	3	2	4	4	2	3
35	j	4	1	4	1	4	2	1	5	2	2	4	3	3	2	4	2	2	5	3	2
36	g	1	5	2	2	4	1	4	2	1	1	2	5	2	2	4	1	4	2	1	1
37	l	5	3	1	3	2	4	5	2	4	1	3	2	3	3	4	3	5	2	4	2
38	i	2	4	4	1	5	1	5	1	5	4	3	4	2	2	5	3	5	2	5	4
39	h	4	2	5	5	2	3	5	2	2	3	3	3	4	3	3	4	4	2	3	3
40	k	2	1	1	4	5	1	4	1	4	2	3	2	2	4	5	2	4	2	3	5
41	j	4	1	4	1	5	2	1	5	2	3	4	3	2	2	4	3	5	5	2	2
42	l	4	2	1	1	1	4	2	1	5	1	3	3	2	4	2	3	4	4	2	2
43	g	3	5	3	2	3	1	3	2	2	2	2	3	4	4	2	4	2	2	4	4
44	i	3	3	4	2	3	4	2	3	4	2	3	3	4	2	3	3	2	3	4	2
45	h	4	1	5	3	2	2	3	2	2	4	3	2	5	3	3	3	4	3	2	3
46	k	4	1	2	4	5	1	5	2	3	3	3	2	3	3	4	2	4	2	2	4
47	j	4	2	2	1	4	2	1	5	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
48	h	2	2	5	4	2	3	4	3	1	3	3	3	4	3	3	3	2	5	3	3
49	l	4	4	2	4	1	3	4	3	5	1	4	2	3	4	3	3	3	4	3	3
50	g	2	3	2	3	4	2	4	2	3	3	4	3	3	3	2	3	4	2	3	3

# Expérience sur l'éblouissement : paramètre de l'éblouissement

Paneliste N°	HS- >LN	HS- >LD	HS- >LS	HS- >LT	LN- >HS	LN- >LD	LN- >LS	LN- >LT	LD- >HS	LD- >LN	LD- >LS	LD- >LT	LS- >HS	LS- >LN	LS- >LD	LS- >LT	LT- >HS	LT- >LN	LT- >LD	LT- >LS
1	2			5		5	1		4			3	4		2			1		1
2		2		5	4		2			2	1		5			5		2	2	
3	3	5					2	5		2	2		1			5	2		2	
4	4			4			2	4	2	2			4		5				2	1
5	3	4				4		5			1	2	4	4			1			1
6		4		2	3		2			2	1		4			5		1	4	
7	3	1					1	5		2	1		4			5	2		2	
8	2			2		4	2		4			2	4		5			1		1
9	2	2				4		5			1	5	4	4			1			1
10	2	2					1	4		2	2		4			4	3		2	
11	2	4					2	5		3	3		4			5	1		1	
12	2			5			2	5	3	2			3		3				3	1
13	2	3					2	5		2	1		4			5	1		2	
14	2			4		3	1		3			5	4		4			1		1
15		3		5	4		2			2	1		1			5		1	2	
16	4	2					3	5		3	1		2			5	1		4	
17	4	4				4		5			1	2	1	4			1			1
18	3			5			4	5	2	1			2		5				1	1
19	4	5					2	5		1	2		3			4	1		2	
20	4			5		4	3		4			5	4		4			1		1
21		2		5	3		2			2	1		3			5		1	2	
22	4	4				4		5			2	4	1	2			1			1
23		4	1		2			5		3	1			3		5	1		2	
24	4			5			2	5	1	2			2		4				2	2
25	2	5					1	5		2	1		5			5	1		2	
26			2	5	4	4			3			5		4	5			1		1
27	1		1			4		5	3			5		5	4		2			1
28		1	3		3	3					1	2		2		4	2	1		
29			2	2	3		1		3	2					4	4		2	4	
30		3	3		2	4					1	4		4		5	1	1		
31			1	5	4	5			2			3		2	5			2		1
32		4	2		2			5		2	1			4		5	1		2	
33	2		1			4		5	2			5		3	5		2			1
34		4	4		2	3					2	4		4		5	1	2		
35			1	4	4		1		2	2					4	5		1	2	
36		4	1		1			4		2	2			1		5	1		2	
37			2	4	3	5			2			3		4	5			1		1
38			1	5	1	4			4			4		5	5			2		1
39	3		2			5		4	2			5		3	5		2			2
40		2	1		4	5					1	2		4		4	1	1		
41			1	4	4		1		3	2					5	5		1	2	
42			1	5	1	2			1			2		4	4			1		1
43		3	3		2			3		2	2			2		5	1		3	
44			2	2	4	3			4			2		3	4			3		3
45	2		2			3		4	2			3		4	5		2			1
46		3	2		3	5					2	4		4		5	1	2		
47			1	4	2		1		3	2					4	5		2	2	
48	3		1			4		2	3			4		3	5		2			2
49			1	5	4	4			3			4		3	4			2		1
50		4	2		3			4		3	2			3		3	2		2	

Expérience dans le salon

Paneliste N°	comfort				glare				color rendering				similarity			
	HA L	SPO T	PLA F	CA P	HA L	SPO T	PLA F	CA P	HA L	SPO T	PLA F	CA P	HA L	SPO T	PLA F	CA P
1	5	5	5		1	1	1	1	3	4	3	3	2	2	2	2
2	6	2	5	5	1	4	3	1	4	2	4	3	1	2	1	1
3	1	5	5	5	1	1	1	1	1	3	3	2	1	2	1	2
4	5	5	2	6	2	1	3	1	3	3	3	3	2	2	2	2
5	5	2	5	6	1	4	3	1	3	3	4	4	2	2	3	4
6	5	6	6	4	1	1	1	4	2	4	3	1	2	3	3	1
7	1	6	5	4	5	4	1	2	1	4	3	2	1	3	1	1
8	5	5	4	3	1	2	2	1	3	3	1	1	2	3	2	1
9	4	6	5	5	4	4	2	1	2	4	2	3	2	4	3	3
10	4	6	6	5	2	2	3	2	2	4	3	3	1	3	3	2
11	5	5	4	6	2	1	1	1	2	2	2	3	2	3	3	4
12	5	2	4	5	1	4	3	1	3	2	3	3	4	1	1	3
13	5	5	2	6	1	2	3	1	3	2	3	4	1	1	2	1
14	6	4	5	5	1	3	2	2	3	3	3	2	2	3	3	2
15	5	4	2	2	1	1	4	1	3	1	3	2	3	1	1	1
16	4	2	3	4	1	1	2	1	2	2	3	1	2	1	1	2
17	5	5	5	4	1	1	3	2	3	4	4	2	2	3	3	2
18	5	4	6	6	1	4	1	1	3	1	4	4	3	1	3	3
19	5	4	5	3	1	1	1	1	3	3	3	2	3	2	3	2
20	6	4	6	5	1	3	2	2	4	2	4	3	3	1	3	2
21	4	6	6	5	1	2	2	2	2	4	4	3	1	3	3	2
22	5	5	4	4	3	3	4	4	1	1	1	1	2	2	1	1
23	4	5	6	4	1	2	1	1	2	4	2	3	3	1	2	2
24	6	5	4	5	1	2	3	2	4	2	3	2	1	3	2	3
25	5	6	4	5	1	1	1	1	3	4	2	3	3	1	1	1
26	4	6	6	4	2	3	3	1	3	2	3	1	2	4	4	2
27	3	6	5	5	1	2	3	1	4	4	3	4	1	2	1	1
28	6	5	4	6	1	4	4	1	4	4	4	4	3	2	3	3
29	5	5	4	5	2	2	4	2	4	4	3	4	2	1	1	1
30	4	4	4	6	2	4	5	1	3	3	2	3	3	3	3	3
31	5	2	4	5	1	5	4	2	2	2	4	3	3	1	1	2
32	6	6	4	6	1	1	3	1	3	3	3	3	2	2	2	2
33	4	3	5	5	1	2	3	1	2	1	3	2	4	1	2	3
34	5	6	6	6	3	1	2	1	3	4	3	3	1	2	1	2
35	6	6	5	5	1	1	2	1	3	4	3	2	1	3	2	1
36	6	6	5	6	1	2	2	1	3	3	2	3	3	1	2	3
37	6	4	5	6	1	2	2	1	4	2	2	3	2	2	1	3
38	4	6	5	4	2	2	1	1	2	4	4	2	2	3	3	4
39	6	5	5	6	1	2	2	1	3	3	3	3	2	1	1	1
40	5	5	5	5	2	1	1	1	4	2	2	3	4	2	2	2
41	6	6	2	5	1	1	6	2	2	2	3	3	2	2	2	2
42	4	6	6	3	1	1	2	1	2	4	4	2	2	3	3	2
43	5	6	4	4	2	1	3	1	3	3	2	2	2	3	2	2
44	5	6	4	5	3	3	4	2	4	4	4	4	2	2	2	2
45	4	6	5	3	1	1	1	1	2	4	4	2	1	4	2	3
46	5	5	5	5	1	2	3	1	0	0	0	0	3	1	2	3
47	6	5	5	6	1	2	2	1	3	2	4	4	1	1	3	2
48	5	5	5	5	2	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2
49	6	6	6	6	1	1	2	1	3	3	4	3	3	2	1	3
50	5	6	6	5	1	1	2	1	3	4	4	3	3	4	3	3

Expérience en compartiments

Paneliste N°	1	2	3	4	confort A	facilité visu A	qualité A	confort B	facilité visu B	qualité B	confort C	facilité visu C	qualité C	confort D	facilité visu D	qualité D
1	b	d	c	a	2	4	2	1	1	1	2	2	3	3	2	3
2	b	a	d	c	2	2	2	1	2	2	1	1	2	2	1	1
3	a	b	d	c	4	3	4	2	3	2	2	2	2	3	4	2
4	c	b	d	a	2	1	2	2	2	2	3	2	3	3	2	2
5	d	a	c	b	3	2	2	1	2	3	2	4	4	4	1	2
6	d	c	b	a	4	4	4	1	1	2	3	3	4	4	4	4
7	a	b	d	c	2	2	2	5	4	3	5	4	3	1	1	1
8	b	a	d	c	2	2	3	2	1	2	2	1	1	2	2	2
9	b	d	c	a	2	2	3	1	1	1	2	2	1	5	3	4
10	c	b	d	a	3	3	4	2	2	1	2	3	2	4	4	3
11	d	a	c	b	3	1	3	2	2	2	1	3	4	3	2	2
12	d	c	b	a	2	2	2	2	1	2	4	4	3	3	3	3
13	b	d	c	a	2	2	2	3	3	3	2	2	2	1	2	2
14	b	a	d	c	2	2	2	4	3	4	3	3	3	3	3	3
15	a	b	d	c	2	3	3	4	2	2	4	4	3	5	3	3
16	d	c	b	a	3	2	1	5	3	2	4	4	4	3	2	2
17	d	a	c	b	2	2	2	3	2	3	2	2	1	4	3	2
18	c	b	d	a	4	3	3	2	1	1	3	2	2	1	1	1
19	a	b	d	c	2	2	2	2	3	2	3	3	2	3	3	2
20	b	a	d	c	2	2	2	2	2	3	2	2	3	3	2	1
21	b	d	c	a	1	1	1	2	2	3	3	2	3	1	1	2
22	c	b	d	a	3	3	2	4	3	2	3	2	2	1	1	1
23	d	a	c	b	3	2	3	2	1	1	2	1	2	3	3	4
24	d	c	b	a	2	2	2	3	2	2	2	3	2	3	4	4
25	a	b	d	c	3	2	2	1	3	3	3	2	1	2	2	1
26	b	d	c	a	2	1	1	3	2	3	3	1	2	2	2	1
27	b	a	d	c	2	1	2	3	3	4	4	4	3	3	2	2
28	d	a	c	b	2	1	1	1	3	2	3	3	2	2	2	1
29	d	a	c	b	2	2	1	4	3	2	3	2	2	1	1	2
30	d	c	b	a	1	1	1	1	2	2	2	3	4	2	2	2
31	a	b	c	d	1	1	1	2	2	2	3	3	3	3	3	3
32	b	a	d	c	2	2	3	2	2	4	2	2	3	2	2	1
33	b	d	c	a	3	3	2	2	2	3	3	3	4	4	2	2
34	c	b	d	a	2	2	2	1	2	2	3	3	2	4	3	5
35	d	a	c	b	2	2	1	2	1	1	1	2	2	2	2	3
36	d	c	b	a	2	1	1	1	2	2	2	2	2	1	1	1
37	a	b	d	c	2	2	1	3	1	3	4	2	4	5	2	1
38	b	a	d	c	2	2	1	2	3	4	3	3	3	2	2	2
39	b	d	c	a	3	2	2	3	2	2	3	3	3	2	3	2
40	c	b	d	a	2	2	1	2	2	1	2	3	3	3	3	2
41	d	a	c	b	3	3	3	2	2	3	3	2	3	1	2	1
42	d	c	b	a	4	4	3	2	1	1	3	2	1	3	4	3
43	a	b	d	c	2	3	4	3	3	3	2	3	3	4	3	2
44	b	a	d	c	2	2	3	3	2	3	3	2	2	1	2	2
45	b	d	c	a	2	2	2	2	2	1	3	3	3	4	3	2
46	c	b	d	a	2	2	2	1	2	2	2	3	2	3	2	2
47	d	a	c	b	1	1	1	2	2	3	2	2	2	3	1	1
48	d	c	b	a	1	3	2	2	1	2	2	1	1	3	3	3
49	a	b	d	c	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	1
50	b	a	d	c	2	1	2	2	1	2	2	1	2	2	1	1

# Expérience dans le bureau

Paneliste					confort	visu	écriture	confort	visu	écriture	confort	visu	écriture	confort	visu	écriture
N°	1	2	3	4	A	A	A	B	B	B	C	C	C	D	D	D
1	b	d	c	a	2	2	2	3	4	1	3	3	4	4	3	3
2	b	a	d	c	2	1	3	1	1	1	2	2	1	2	2	2
3	a	b	d	c	1	2	2	3	2	3	4	4	4	4	3	3
4	c	b	d	a	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	d	a	c	b	2	4	3	1	1	1	4	3	5	5	3	5
6	d	c	b	a	4	2	4	3	2	3	5	4	5	5	4	3
7	a	b	d	c	4	3	4	2	1	1	2	3	4	1	1	1
8	b	a	d	c	2	2	3	3	2	3	2	3	3	3	3	3
9	b	d	c	a	1	2	1	2	3	1	4	5	4	5	5	4
10	c	b	d	a	2	2	3	2	2	1	3	3	4	2	3	2
11	d	a	c	b	2	3	1	3	1	2	1	2	1	3	2	2
12	d	c	b	a	2	2	1	2	1	1	3	2	2	4	3	3
13	a	b	d	c	3	2	2	3	2	2	3	2	2	2	3	3
14	b	a	d	c	3	3	3	2	2	2	4	4	3	2	2	2
15	b	d	c	a	1	2	2	3	3	4	5	5	3	5	5	4
16	d	c	b	a	5	3	2	1	1	3	2	3	2	1	1	3
17	d	a	c	b	3	2	1	1	2	2	4	4	2	2	4	2
18	c	d	b	a	2	1	1	4	2	3	3	2	2	2	2	2
19	a	b	d	c	2	3	1	2	3	3	3	3	4	2	3	2
20	b	a	d	c	3	2	2	2	2	2	3	2	2	2	2	2
21	b	d	c	a	2	2	2	2	2	1	4	3	4	3	3	3
22	c	b	d	a	3	1	2	4	3	4	3	3	2	2	1	2
23	d	a	c	b	1	1	1	2	1	2	5	5	4	5	4	4
24	d	c	b	a	1	2	1	4	1	1	2	4	4	3	4	3
25	a	b	d	c	2	3	3	1	1	1	2	2	2	1	2	1
26	b	d	c	a	1	1	1	2	2	1	2	2	1	3	3	2
27	b	a	d	c	4	3	2	2	2	1	3	3	3	3	2	2
28	c	b	d	a	1	2	1	2	1	2	3	2	2	2	1	3
29	d	a	c	b	2	1	1	1	1	3	2	1	1	1	1	1
30	d	c	b	a	2	3	3	3	2	2	1	1	1	2	2	2
31	a	b	c	d	1	1	1	2	1	1	3	3	3	4	4	4
32	b	a	d	c	4	4	4	2	2	3	1	2	2	2	2	3
33	b	d	c	a	3	2	3	2	1	3	4	3	4	1	2	2
34	c	b	d	a	3	2	2	2	1	2	2	3	3	3	4	2
35	d	a	c	b	2	2	2	1	2	2	1	2	2	2	2	3
36	d	c	b	a	4	3	4	3	3	3	3	2	3	2	2	2
37	a	b	d	c	4	3	2	3	2	2	5	4	3	2	2	1
38	b	a	d	c	4	2	5	1	1	1	3	3	4	2	2	2
39	b	d	c	a	3	2	2	3	3	2	3	3	1	2	2	2
40	c	b	d	a	3	1	3	1	2	1	2	2	2	2	3	1
41	d	a	c	b	3	1	1	2	1	1	4	2	2	2	2	2
42	d	c	b	a	4	3	2	3	2	2	4	3	2	2	2	3
43	a	b	d	c	3	2	3	3	3	3	3	3	4	2	3	3
44	b	a	d	c	4	2	3	1	2	1	2	2	3	2	2	2
45	b	d	c	a	3	2	2	2	2	3	4	3	1	3	2	2
46	c	b	d	a	4	3	1	3	1	1	2	3	1	3	2	1
47	d	a	c	b	1	1	2	2	1	3	3	3	1	3	3	3
48	d	c	b	a	2	3	2	2	1	1	3	2	3	2	1	2
49	a	b	d	c	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1
50	b	a	d	c	1	1	2	1	1	2	3	2	2	3	2	2

## Annexe 5 : Valeurs des paramètres physiques issues des mesures et utilisées dans les calculs des modèles sur le confort visuel

		1 level	2 uniformity	3 contraste	4 color rendering
Salon	LED Diffuse n°1	0,648	/	0,929	0,750
	Spot à LED	0,607	/	0,893	0,723
	LED Diffuse n°2	0,554	/	0,858	0,500
	Halogène	0,620	/	0,959	0,750
Compartiments	Halogène	1,000	/	0,909	0,714
	LED chaude	0,999	/	0,916	0,548
	LED neutre	1,000	/	0,896	0,493
	LED froide	0,942	/	0,447	0,583
Bureau	Halogène + Tube FL	0,223	0,816	0,391	0,467
	CFL + Tube FL	0,216	1,030	0,500	0,446
	Spot à LED + tube à LED	0,255	0,920	0,271	0,492
	LED diffuse + tube à LED	0,280	1,622	0,292	0,797

		5 color temperature	6 direction
Salon	LED Diffuse n°1	0,891	0,053
	Spot à LED	0,883	0,940
	LED Diffuse n°2	0,304	0,752
	Halogène	0,893	0,268
Compartiments	Halogène	0,879	/
	LED chaude	0,366	/
	LED neutre	0,258	/
	LED froide	0,402	/
Bureau	Halogène + Tube FL	1,028	0,355
	CFL + Tube FL	1,617	1,738
	Spot à LED + tube à LED	1,219	0,055
	LED diffuse + tube à LED	1,575	0,600



## Annexe 6 : Notion d'une source Lambertienne

Une **source lumineuse lambertienne (ou orthotrope)** respecte la loi de Lambert. C'est une source de lumière uniforme angulairement, c'est-à-dire dont la luminance énergétique est la même dans toutes les directions<sup>1</sup>. Il ne faut pas confondre une telle source avec une source lumineuse isotrope, pour laquelle c'est l'intensité lumineuse qui est la même dans toutes les directions ; pour une source lumineuse orthotrope, l'intensité lumineuse dépend elle de la direction, selon  $I = I_0 \cos \theta$  où  $\theta$  est l'angle de la direction par rapport à la normale de la source.

La luminance d'une source lumineuse orthotrope, d'après la loi de Lambert, vaut :

$$L = \frac{M}{\pi \cdot n^2} = \frac{\Phi}{\pi \cdot n^2 \cdot A}$$

où

- $M$  est l'exittance énergétique de la source, en  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$  ;
- $\Phi$  est le flux énergétique de la source, en  $\text{W}$  ;
- $L$  est la luminance énergétique de la source, en  $\text{W} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$  ;
- $n$  est l'indice optique du milieu de propagation ;
- $A$  est l'aire de la surface de la source, en  $\text{m}^2$ .

En radiométrie, il est fréquent de considérer qu'une surface est lambertienne. Cette approximation est acceptable pour des surfaces rugueuses ou mates, mais pas pour les miroirs.

Parmi les sources lumineuses primaires, le corps noir, source primaire incandescente idéale, est une source orthotrope. Le soleil en est un bon exemple concret.

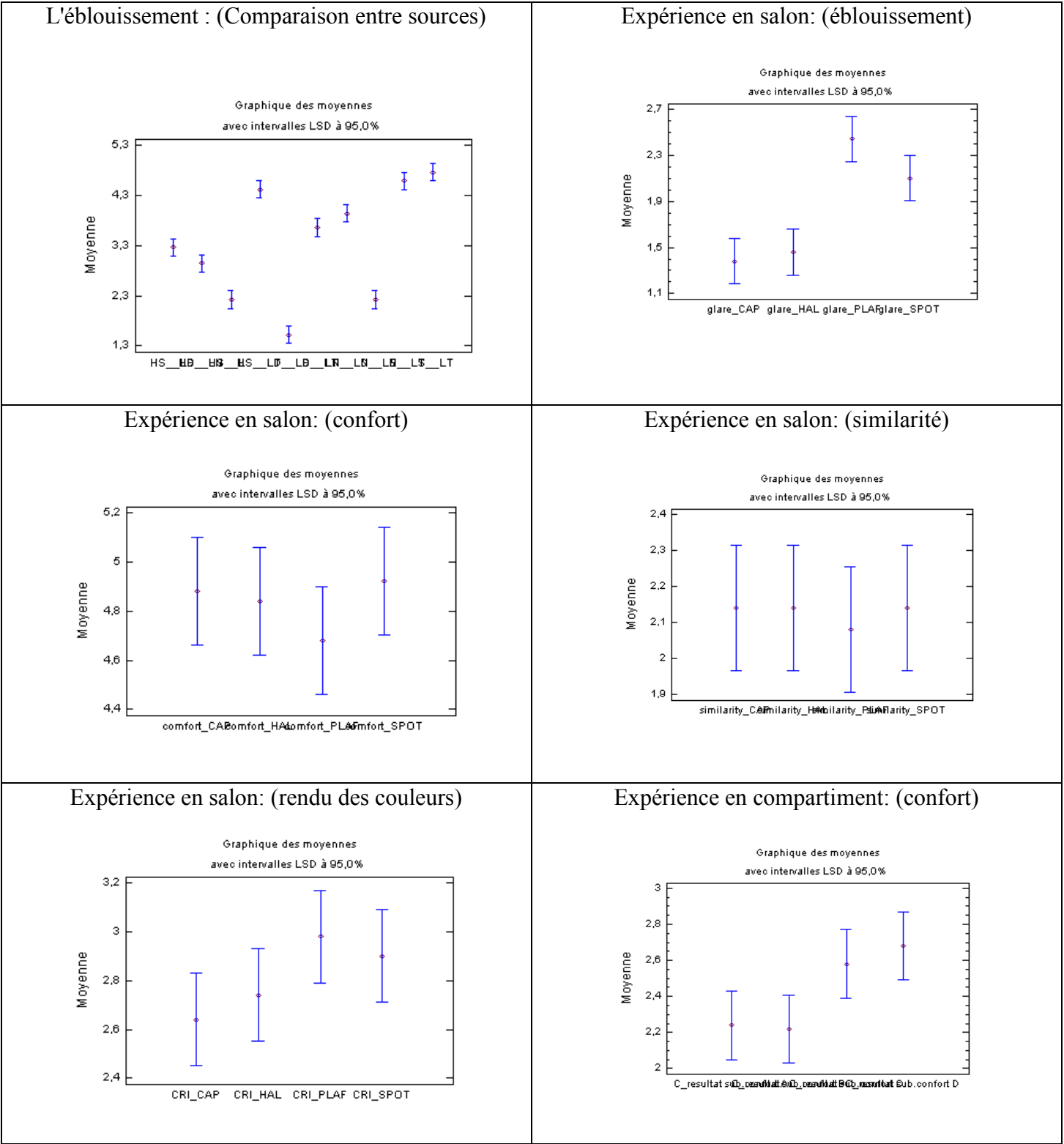
Parmi les sources lumineuses secondaires (en réflexion ou en transmission), le diffuseur parfait est une source orthotrope, en plus de renvoyer ou de transmettre toute la lumière qu'il reçoit<sup>1</sup>.

Si la luminance d'une source orthotrope est la même sur toute sa surface, elle est dite uniforme angulairement et spatialement<sup>1</sup>.

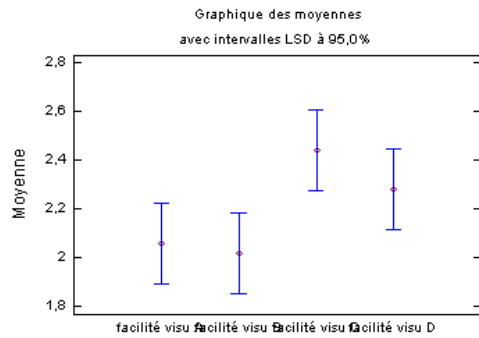
Quelle que soit sa forme, une source lumineuse parfaitement orthotrope paraît plane. Le soleil, par exemple, semble être un disque dans le ciel alors qu'il est en réalité sphérique.

# Annexe 7 : Statistiques pour les expériences sur le confort visuel

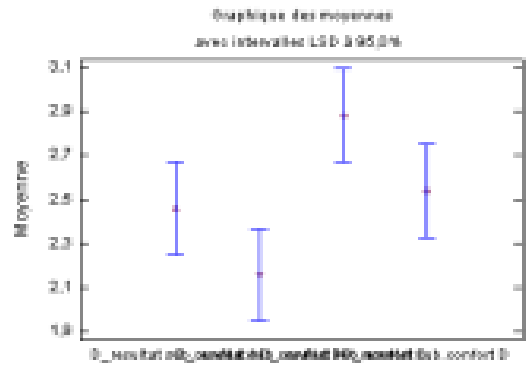
## Expérience sur



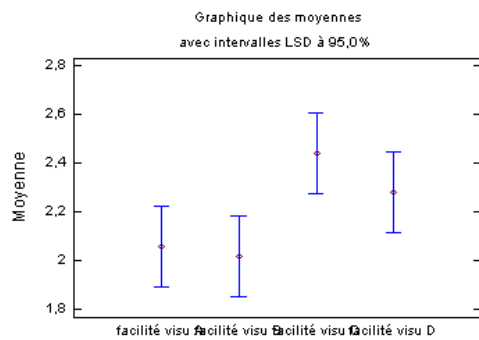
### Expérience en compartiment: (facilité de visualisation)



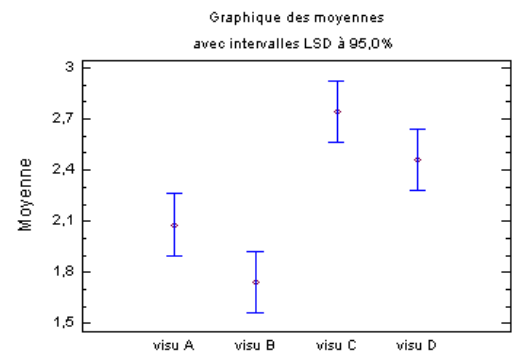
### Expérience en bureau: (confort)



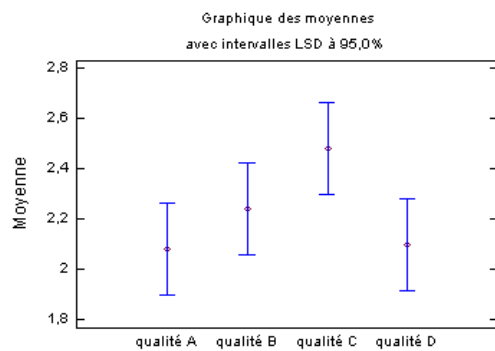
### Expérience en compartiment: (facilité de visualisation)



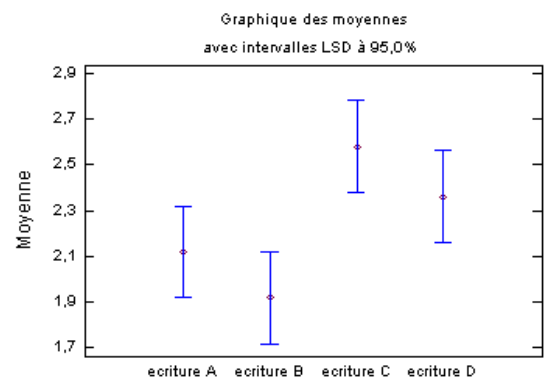
### Expérience en bureau: (facilité de visualisation)



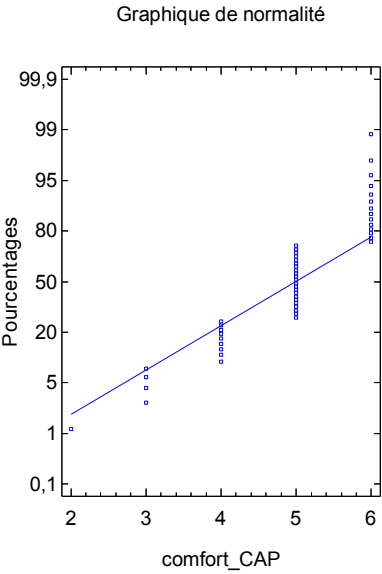
### Expérience en compartiment: (qualité des documents)



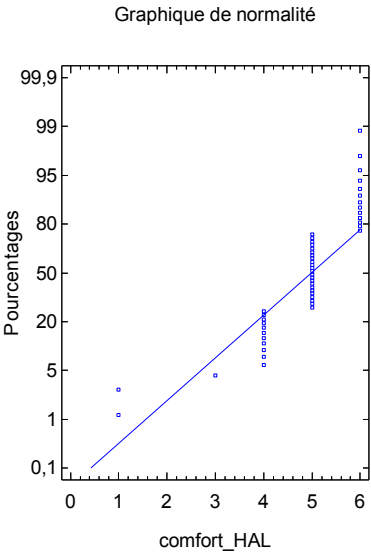
### Expérience en bureau: (facilité d'écriture)



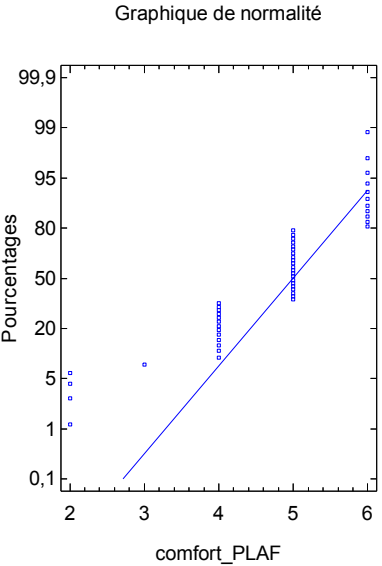
Configuration A (cap):



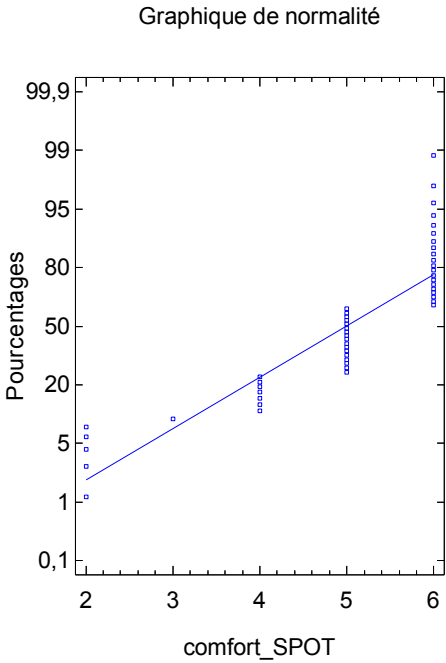
Configuration B (HAL) :



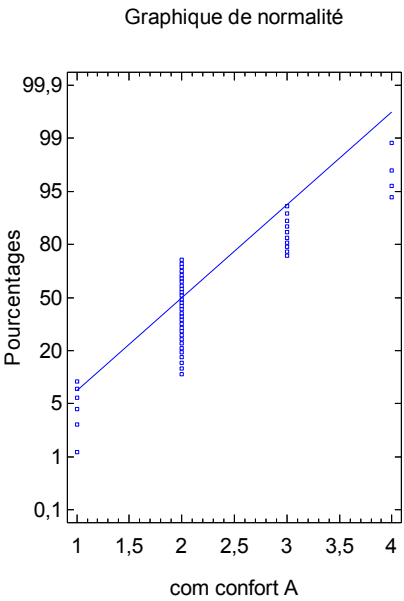
Configuration C (PLAF) :



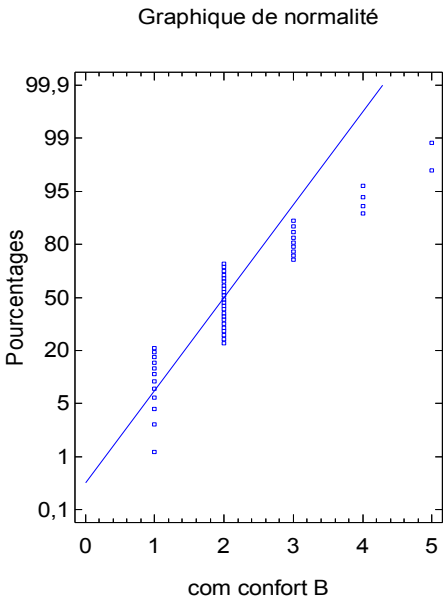
Configuration D (SPOT):



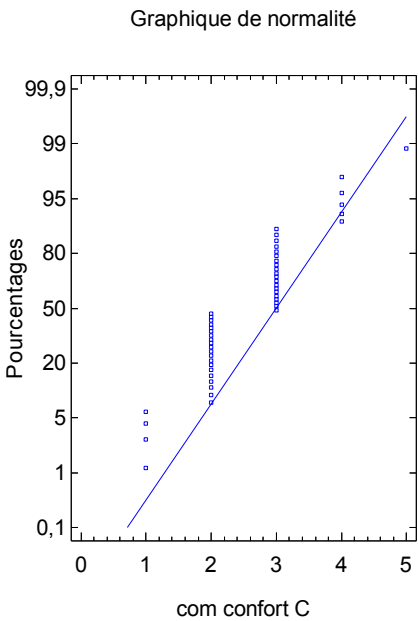
Configuration A :



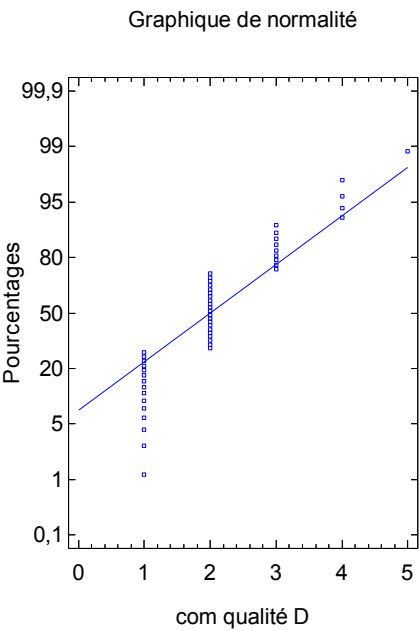
Configuration B :



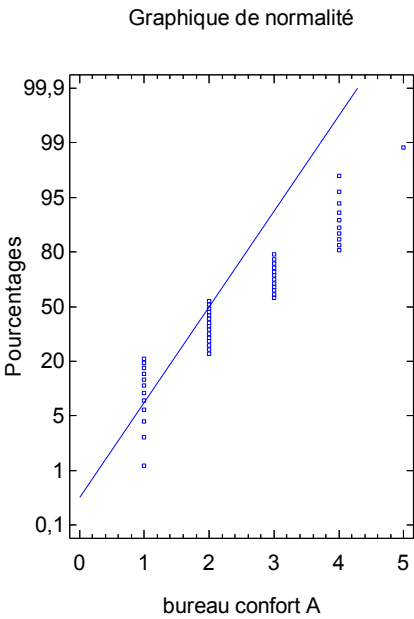
Configuration C :



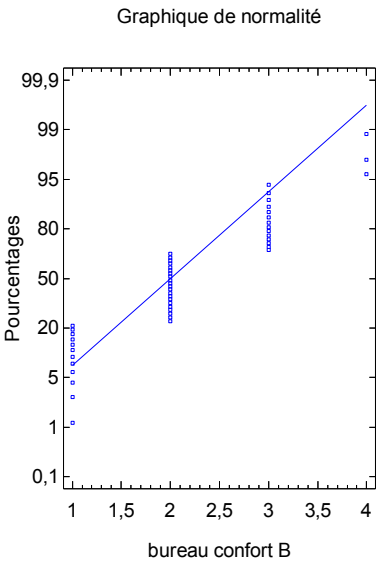
Configuration D :



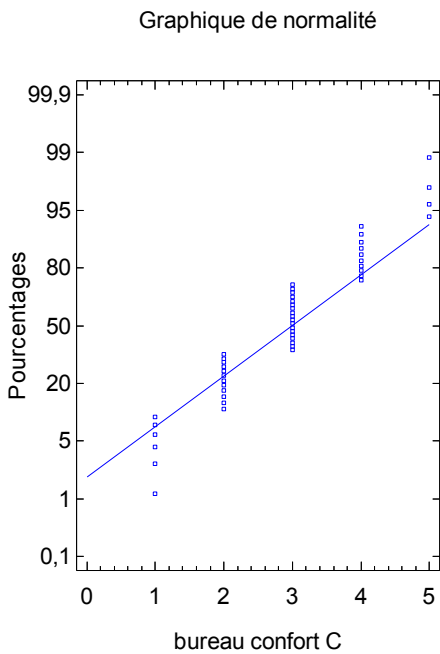
Configuration A :



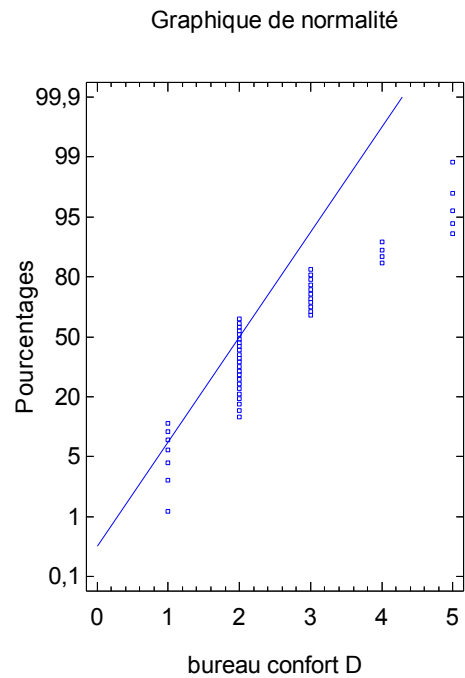
Configuration B :



Configuration C :



Configuration D :



Annexe 8 : Questionnaires et textes explicatifs des expériences

Nom/prénom		Age:		Sexe		M - F		hh jj/mm		feuille n°2	
Ordre éclairage	Préférence globale	Fidélité des couleurs	Qualité de la vivacité des couleurs	Naturel des couleurs (global)	Naturel fruits & légumes	Naturel peau	Naturel plantes	rendu de la charte couleur			
1	5 4 3 2 1 +	5 4 3 2 1 - +	5 4 3 2 1 - +	5 4 3 2 1 - +	5 4 3 2 1 - +	5 4 3 2 1 - +	5 4 3 2 1 - +	5 4 3 2 1 - +	5 4 3 2 1 - +		
2	5 4 3 2 1 +	5 4 3 2 1 - +	5 4 3 2 1 - +	5 4 3 2 1 - +	5 4 3 2 1 - +	5 4 3 2 1 - +	5 4 3 2 1 - +	5 4 3 2 1 - +	5 4 3 2 1 - +		
3	5 4 3 2 1 +	5 4 3 2 1 - +	5 4 3 2 1 - +	5 4 3 2 1 - +	5 4 3 2 1 - +	5 4 3 2 1 - +	5 4 3 2 1 - +	5 4 3 2 1 - +	5 4 3 2 1 - +		
4	5 4 3 2 1 +	5 4 3 2 1 - +	5 4 3 2 1 - +	5 4 3 2 1 - +	5 4 3 2 1 - +	5 4 3 2 1 - +	5 4 3 2 1 - +	5 4 3 2 1 - +	5 4 3 2 1 - +		
5	5 4 3 2 1 +	5 4 3 2 1 - +	5 4 3 2 1 - +	5 4 3 2 1 - +	5 4 3 2 1 - +	5 4 3 2 1 - +	5 4 3 2 1 - +	5 4 3 2 1 - +	5 4 3 2 1 - +		
6	5 4 3 2 1 +	5 4 3 2 1 - +	5 4 3 2 1 - +	5 4 3 2 1 - +	5 4 3 2 1 - +	5 4 3 2 1 - +	5 4 3 2 1 - +	5 4 3 2 1 - +	5 4 3 2 1 - +		
7	5 4 3 2 1 +	5 4 3 2 1 - +	5 4 3 2 1 - +	5 4 3 2 1 - +	5 4 3 2 1 - +	5 4 3 2 1 - +	5 4 3 2 1 - +	5 4 3 2 1 - +	5 4 3 2 1 - +		
8	5 4 3 2 1 +	5 4 3 2 1 - +	5 4 3 2 1 - +	5 4 3 2 1 - +	5 4 3 2 1 - +	5 4 3 2 1 - +	5 4 3 2 1 - +	5 4 3 2 1 - +	5 4 3 2 1 - +		
9	5 4 3 2 1 +	5 4 3 2 1 - +	5 4 3 2 1 - +	5 4 3 2 1 - +	5 4 3 2 1 - +	5 4 3 2 1 - +	5 4 3 2 1 - +	5 4 3 2 1 - +	5 4 3 2 1 - +		

Présentation du test - on traite les questions à la fin

**titre : Jugement du rendu des couleurs (apparence colorée) des objets présentés sous les éclairages testés (classiques et à LED)**

**déroulement :**

Le déroulement se passe en 4 phases

phase 1 test visuel qui sera expliqué à la fin de la présentation

phase 2 passage rapide de 4 éclairages 2 fois ou plus si vous voulez pour avoir un aperçu, observer les changements

se fixer une échelle de notation

phase 3 jugement de 9 éclairages dans un ordre donné

phase 4 jugement des mêmes 9 éclairages dans un ordre différent **(pas pour tester le panéliste - mais car l'éclairage précédent peut influencer sur l'éclairage mis en place )**

**Vous pouvez vous déplacer dans la pièce pour mieux observer les objets**

Présentation du questionnaire : 2 feuilles      **feuille 1**      information personnelle  
avec couleur de peau (claire, mate, halée, ..)  
   **feuille 2**      nom seul

échelle de notation		
très bon rendu		5
bon rendu		4
rendu moyen		3
rendu insuffisant/ pauvre		2
rendu très insuffisant/très pauvre		1

4 critères généraux (impression globale) notés et 1 mire	
préférence globale	impression d'ensemble suivant vos propres critères
fidélité des couleurs	qualité de préservation des couleurs originales impression de fausses ou de vraies couleurs
vivacité des couleurs	vivacité est opposé à sans couleur/terne on insiste sur le fait que l'on note une qualité : on aime la vivacité ou pas des objets
naturel	degré de naturel (opposé à artificiel) des teintes familières ou connues estimation globale puis spécifique sur la peau, les fruits/légumes, les plantes pour le global : impression d'ensemble - autre objets couleurs familières : bois, liège, ect...
mire	la qualité de la mire est la capacité d'afficher un ensemble large de teintes et de saturations avec des nuances et sans dominante globale, on notera le nombre important de teintes chair/feuillage/bleu ciel et de couleur proches

**on revient sur la différence entre fidélité et naturel (relecture définition) au travers d'exemples**  
**votre couleur de peau peut paraître un peu plus halée (donc non fidèle) mais tout en restant naturelle,**  
**le feuillage peut être plus jaune ou plus vert (donc non fidèle) mais rester naturel**

une télécommande est à votre disposition pour allumer/éteindre un éclairage de transition :  
allume dès que l'éclairage testé est éteint / éteint dès que l'éclairage suivant apparaît,



TEST 1	Visualisation avec une lampe éblouissante
--------	---

panéliste n°		ordre n°	
--------------	--	----------	--

sans lampe :	énumérer 2 fois les lettres de la case 4-C
avec lampe :	énumérer 2 fois les lettres de la case 4-C

Eblouissement perçu par rapport à la lampe précédente
---

	++ beaucoup plus	+ un peu plus	= identique	- un peu moins	-- beaucoup moins
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					

Difficulté pour effectuer la tâche demandée par rapport à la lampe précédente
---

	++ plus difficile	+ un peu plus difficile	= identique	- un peu plus facile	-- plus facile
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					

Pour l'expérimentateur:

SUJET N°	
DATE	
HEURE	
INTERNE LNE (O/N)	

-----

EVALUATION DU CONFORT VISUEL

Vous allez participer à une série d'expériences dont le but est d'évaluer le confort visuel pour différentes scènes d'éclairage. Des instructions détaillées vous seront données tout au long de l'expérience.  
Les informations suivantes sont données pour un traitement statistique et restent confidentielles.

NOM \_\_\_\_\_

PRENOM \_\_\_\_\_

AGE \_\_\_\_\_

SEXE (H/F) \_\_\_\_\_

COULEUR DES YEUX ( [C] CLAIR/ [F] FONCE)\_\_\_\_\_

DROITIER / GAUCHER (D/G) \_\_\_\_\_

TAILLE (m) \_\_\_\_\_

Répondez aux questions suivantes

PORTEZ-VOUS DES    lunettes ☐                      lentilles ☐                      Rien ☐

NOMBRE D'HEURES PASSEES DEVANT UN ECRAN AVANT CE TEST ?

Moins de 2 heures ☐

Entre 3 et 5 heures ☐

Plus de 6 heures ☐

**COMMENT VOUS SENTEZ VOUS PHYSIQUEMENT ?**

Bien ☐

Juste bien ☐

Pas bien ☐

Je ne sais pas ☐

**COMBIEN D'HEURES AVEZ-VOUS DORMI CETTE NUIT? \_\_\_\_\_**

**ET EN COMPARAISON A VOTRE NOMBRE D'HEURES HABITUEL ?**

Généralement plus ☐

Généralement moins ☐

Identique ☐

Je ne sais pas ☐

**Comment qualifiez-vous votre sensibilité à l'éblouissement dans la vie de tous les jours?**

Je ne supporte que les ambiances sombres	<input type="checkbox"/>
L'éblouissement me gêne beaucoup	<input type="checkbox"/>
L'éblouissement me gêne mais je le supporte	<input type="checkbox"/>
Je suis insensible à l'éblouissement	<input type="checkbox"/>
Sans opinion	<input type="checkbox"/>

<b>TEST 3</b>	<b>Visualisation en COMPARTIMENT</b>	
---------------	--------------------------------------	--

**I - Tâche initiale :**

Aller dans chaque compartiment dans l'ordre A B C D y rester approximativement 1 minutes regardez les photo une à une, parcourez le dépliant puis les étaler sur la table puis les ranger comme présentés au début

**II - Tâche individuelle et notation :**

Aller dans chaque compartiment dans l'ordre ci-dessous y rester approximativement 3 minutes regardez les photo une à une, parcourez le dépliant puis les étaler sur la table puis les ranger comme présentés au début et remplir le questionnaire après chaque visualisation

**III - Tâche finale :** Indiquer votre classement préférentiel en bas de la page

n° panéliste	
ordre n°	

compartiment	
--------------	--

note	très bon ++	bon +	moyen 0	insuffisant -	très insuffisant --
confort/agrément					
facilité de visualisation					
qualité photo/texte					

compartiment	
--------------	--

note	très bon ++	bon +	moyen 0	insuffisant -	très insuffisant --
confort/agrément					
facilité de visualisation					
qualité photo/texte					

compartiment	
--------------	--

note	très bon ++	bon +	moyen 0	insuffisant -	très insuffisant --
confort/agrément					
facilité de visualisation					
qualité photo/texte					

compartiment	
--------------	--

note	très bon ++	bon +	moyen 0	insuffisant -	très insuffisant --
confort/agrément					
facilité de visualisation					
qualité photo/texte					

A la fin indiquer votre préférence dans l'ordre décroissant

	1er (meilleur)	2nd	3ème	4ème
A ou B ou C ou D				

<b>TEST 4</b>	<b>Visualisation en BUREAU</b>
---------------	--------------------------------

**Tâche initiale :**

Eclairer successivement chaque lampe bureau A B C D avec l'éclairage plafond associé AB ou CD pour chaque configuration lire les titres des affiches

**Tâche individuelle :**

Eclairer successivement chaque lampe bureau avec l'éclairage plafond associé AB ou CD dans l'ordre indiqué ci-dessous, pour chaque configuration lire les titres des affiches et les écrire sur une feuille blanche

**Tâche finale :** Indiquer votre classement préférentiel en bas de la page

panéliste n°	
configuration n°	

compartiment	
--------------	--

note	très bon ++	bon +	moyen 0	insuffisant -	très insuffisant --
confort/agrément					
facilité de visualisation					
facilité d'écriture					

compartiment	
--------------	--

note	très bon ++	bon +	moyen 0	insuffisant -	très insuffisant --
confort/agrément					
facilité de visualisation					
facilité d'écriture					

compartiment	
--------------	--

note	très bon ++	bon +	moyen 0	insuffisant -	très insuffisant --
confort/agrément					
facilité de visualisation					
facilité d'écriture					

compartiment	
--------------	--

note	très bon ++	bon +	moyen 0	insuffisant -	très insuffisant --
confort/agrément					
facilité de visualisation					
facilité d'écriture					

**A la fin indiquer votre préférence dans l'ordre décroissant**

	1er (meilleur)	2nd	3ème	4ème
A ou B ou C ou D				

## Présentation générale - jour /10/12

Vous allez participer à 4 expériences subjectives de 15/20 ou 30 min chacune – repos inclus, vous êtes au point de rendez-vous ou il faut revenir après chaque expérience – se reposer:

- Initial : mettre la blouse grise - remplir la feuille d'information – prendre les questionnaires à numéroté  
(pour les personnes extérieures au LNE feuille supplémentaire)
- N°1 : évaluation de l'éblouissement -> Jordi - 15/20 minutes – 1<sup>er</sup> panéliste
- N°2 : confort visuel en salon -> Laura -> 30 minutes – 2<sup>nd</sup> panéliste
- N°3 : compartiment -> Dominique : 3<sup>ème</sup> panéliste – 15/20 minutes
- N°4 : bureau -> Dominique – 15/20 minutes – 3<sup>ème</sup> panéliste

## Présentation test X : oral + instruction sur feuille // numéro d'imputation à communiquer

### Matin

Pièce I – Jordi Labo L25	Pièce II – Laura Labo L25	Pièce III – Dominique SEV	Pièce IV - Dominique bureau
2	1	3	
3			2
	2	1	3
1			
	3	2	1

### Après-midi

Pièce I – Jordi Labo L25	Pièce II – Laura Labo L25	Pièce III – Dominique SEV	Pièce IV - Dominique bureau
2	1	3	
3			2
	2	1	3
1			
	3	2	1

### matin

Pièce I – Jordi Labo L25	Pièce II – Laura Labo L25	Pièce III – Dominique SEV	Pièce IV - Dominique bureau
2	1		
			2
	2	1	
1			
		2	1

### Après-midi

Pièce I – Jordi Labo L25	Pièce II – Laura Labo L25	Pièce III – Dominique SEV	Pièce IV - Dominique bureau
2	1		
			2
	2	1	
1			
		2	1

--